

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

СИБИРСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ В. В. КУЙБЫШЕВА

А. Н. ШВЕЦОВ

ОСНОВЫ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ
ОСТАЛИВАНИЕМ



ЗАПАДНО-СИБИРСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

1973

щее время получило широкое распространение в ремонтной практике.

Переход от мелкосерийной организации восстановления деталей к серийной означает не простое количественное наращивание объема выполняемых работ, а является новым качественным скачком в технологии восстановления деталей и организации ремонтного производства в целом.

Существующая в настоящее время на авторемонтных заводах система разработки и подготовки деталей к восстановлению базируется на разработке индивидуальных технологических процессов и не способствует повышению качества восстанавливаемых деталей, экономичности и росту технологического прогресса.

Проблема износостойкости и долговечности деталей машин, восстановленных электролитическим железом, еще не решена полностью. До настоящего времени нет обобщенных рекомендаций по использованию простых хлористых, горячих электролитов осталивания. Частные рекомендации по мало-концентрированным электролитам нуждаются в уточнениях. Отсутствуют рекомендации по выбору параметров, условий и расчету режимов электролиза. Большинство исследователей и практиков считают, что покрытия электролитического железа по твердости и чистоте поверхности должны соответствовать требованиям чертежа на новую деталь, не учитывая при этом специфику свойств электролитического железа.

Отсутствие обоснованных рекомендаций по обработке электролитического железа и по величине припуска покрытий под механическую обработку значительно усложняет построение всего комплекса операций по восстановительной технологии.

Вышеизложенные задачи и послужили поводом для проведения научно-исследовательских работ автора, который проводил их первоначально в МАДИ под руководством проф. М. П. Мелкова, а затем — на кафедре «Эксплуатация и ремонт автомобилей» СибАДИ. В книге сделана попытка обобщить материал о влиянии технологических основ процесса осталивания на износостойкость восстановленных деталей машин и показать особенности и специфику электролитического железа.

Надеясь, что читатель имеет основные понятия по вопросам механизма осаждения железа и знаком с технологическим процессом осталивания, автор не претендует на всесторонний охват и полноту освещения всех затронутых вопросов.

Возникшие у читателя замечания, дополнения или пожелания — с благодарностью будут автором приняты, изучены и учтены в дальнейшей работе.

В заключение автор считает приятным долгом поблагодарить за ряд ценных замечаний и советов доктора технических наук, профессора М. П. Мелкова; за помощь в методических вопросах исследования физико-химических свойств электролитов осталивания — доктора химических наук, профессора В. Б. Ратинова; за обсуждение и критические замечания по ряду излагаемых вопросов исследования — коллектив кафедры «Производство и ремонт автомобилей» МАДИ; а также с признательностью упоминает консультации по вопросам групповой технологии восстановления деталей, которые дал автору ныне покойный доктор технических наук, профессор К. Т. Кошкин.

Глава I

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА

1. Антифрикционность покрытий электролитического железа

Антифрикционность — свойство трущейся пары обеспечивать устойчивый воспроизводимый процесс в условиях трения при граничной смазке, с малой интенсивностью изнашивания.

Поверхности деталей, восстановленные электролитическим железом, в основном работают в узлах трения. В зависимости от условий работы сопряжений, в них возникает постоянное или кратковременное граничное трение, которое создает основные предпосылки к интенсификации износа.

Распространенными контактирующими металлами, работающими с покрытиями, являются чугуны (СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36), оловянно-свинцовистые бронзы (БрОЦС6-6-4,5; БрОЦС6-6-3; БрОЦС5-5-5), алюминиевые сплавы (АК-4, АЛ-4, Д-1) и сплавы СОС6-6.

На основе указанных особенностей и было принято решение о проведении исследований антифрикционных и износных свойств покрытий электролитического железа в условиях, близких к граничному трению, в контакте с широко распространенными подшипниковыми материалами.

Долговечность новых деталей машин при их изготовлении обеспечивается структурой металлов и различными методами термической обработки. У поверхностей деталей, восстановленных остоаливанием, долговечность обеспечивается точным соблюдением условий и режимов электролиза. К условиям электролиза относятся: состав электролита по соли железа ($C_{\text{ме}}$, г/л) и кислоте (HCl, г/л), температура электролита

($t^{\circ}\text{C}$). Режим электролиза составляют: катодная плотность тока (D_k , а/дм²), объемная плотность тока (D_0 , а/л) и время электролиза (τ , час.).

Условия электролиза в процессе восстановления деталей должны быть постоянными, а режимы электролиза — изменяемыми, в зависимости от физико-механических свойств покрытий. От условий и режимов электролиза зависят качество и микротвердость покрытий (рис. 1). Микротвердость является основным контролируемым показателем свойств покрытий.

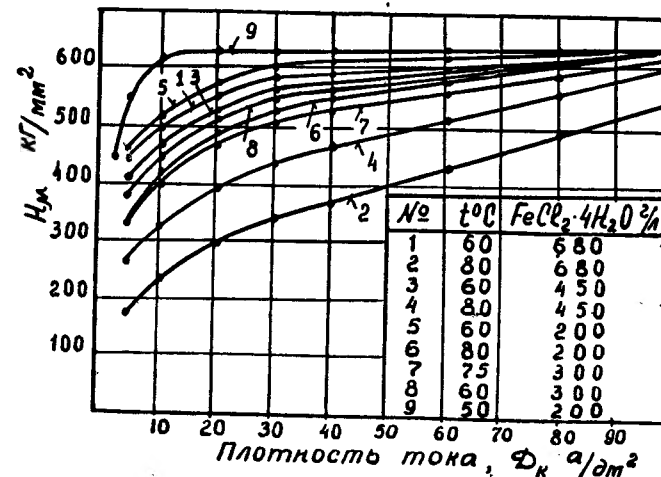


Рис 1. Влияние компонентов электролиза на микротвердость покрытий.

Покрытия для исследования антифрикционных и износных свойств были получены в основном из электролита: 300 г/л $\text{Fe} \cdot \text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 1,5$ г/л HCl, температура $t = 75^{\circ}\text{C}$. Объемная плотность тока была постоянной $D_0 = 1,5$ а/л. Катодная плотность тока изменялась в широком диапазоне от $D_k = 5$ а/дм² до $D_k = 60$ а/дм².

Одно из основных свойств антифрикционности трущихся пар — их нечувствительность к схватыванию при возрастающих удельных нагрузках.

Схватывание проявляется при критических удельных нагрузках резким скачкообразным возрастанием силы трения, коэффициента трения, температуры в зоне контакта.

Причина возникновения таких критических пороговых изменений — переход одного вида изнашивания в другой.

Выявление критических нагрузок схватывания у исследуемых пар проводилось ступенчатым нагружением образцов. Исходная нагрузка была — 10 кг/см^2 , интервалы нагружения: до 30 кг/см^2 — через 5 кг/см^2 , а далее через — 10 кг/см^2 . Переход с исходной нагрузки на последующие производился после наступления точки стабилизации. Под точкой стабилизации понималось такое состояние контактной пары, когда при данной удельной нагрузке (Q) момент трения и температура в околосконтактной зоне имели минимальные установившиеся значения.

Схватывание покрытий, имеющих разную величину микротвердости, происходит не при одинаковых значениях удельной нагрузки и зависит от марки сопряженного подшипникового материала (табл. 1).

Таблица 1

Влияние микротвердости покрытий и марки подшипникового материала на величину Q

Сочетание исследуемых пар		Нагрузка схватывания, $Q \text{ кг/см}^2$
марка материала контртела	микротвердость покрытий, $H_{\text{М50}}, \text{кг/мм}^2$	
Серый чугун СЧ15-32	450	50
	500	150
	550	140
	575	100
	Сталь 45 (т. о.)	60
Алюминиевый сплав АК-4	375	50
	400	110
	450	80
	500	50
	550	40
Бронза БрОЦС6-6-4,5	450	50
	500	90
	550	170
	575	50
	Сталь 45 (т. о.)	40
Сплав СОС6-6	450	35
	500	40
	550	50
	575	60
	630	100
	Сталь 45 (т. о.)	70

Каждому сопряженному материалу (контртелу) соответствует определенная величина микротвердости покрытия, при которой удельная нагрузка схватывания имеет максимальное значение. То значение величины микротвердости покрытий, при которой схватывание с данным материалом контртела происходит при максимальном удельном давлении, названо оптимальным (табл. 2).

Таблица 2

Оптимальные значения микротвердости покрытий в зависимости от сопряжения подшипникового материала

Марка сопряженного материала	Микротвердость покрытия $H_{\text{М}} \text{ опт кг/мм}^2$	Q_{max} схватывания, кг/см^2
СЧ15-32	500	150
АК-4	400	110
БрОЦС6-6-4,5	550	170
Сплав СОС6-6	630	100

Отклонение микротвердости покрытий от найденных оптимальных значений в ту или иную сторону обязательно приводит к уменьшению величины удельной нагрузки схватывания.

Контактирование 2-х поверхностей трущейся пары сопровождается упруго-пластической деформацией. Величина упруго-пластической деформации зависит от физико-механических свойств контакта. Деформация может протекать как с преобладанием упругих, так и с преобладанием пластических свойств.

Отклонение величины микротвердости $H_{\text{М}}$ покрытий от оптимальных значений способствует в случае снижения $H_{\text{М}}$ увеличению пластических свойств контакта, а в случае повышения $H_{\text{М}}$ — росту упругих свойств контакта.

В первом случае при увеличении пластической деформации происходит отеснение металла покрытий в процессе трения в стороны от мест контакта. Многократные пластические деформации приводят к усталостному разрушению поверхностей трения. Под воздействием этих деформаций наблюдается разрушение окисных пленок на поверхности контакта. В местах разрушения металла покрытия появляются локальные зоны схватывания, которые за короткий промежуток времени перерастают в спонтанные.

Во втором случае с увеличением $H_{\text{М}}$ покрытий преобладают упругие свойства контакта. Трущиеся поверхности покрытий начинают разрушаться от явлений «перенаклепа» с обра-

зованием хрупких частиц износа, которые интенсифицируют абразивное изнашивание. Скорость образования поверхностных пленок у контактирующих пар становится меньше скорости их изнашивания. По этой причине и наблюдаются явления схватывания при меньших удельных нагрузках.

В аналогичных условиях для сравнения были испытаны контактирующие пары «Сталь 45 (т. о.)* — контртело». Схватывание этих исследуемых пар происходило при меньших величинах удельных нагрузок по сравнению с покрытиями. Такое отличие представляется возможным объяснить лучшими антифрикционными свойствами покрытий.

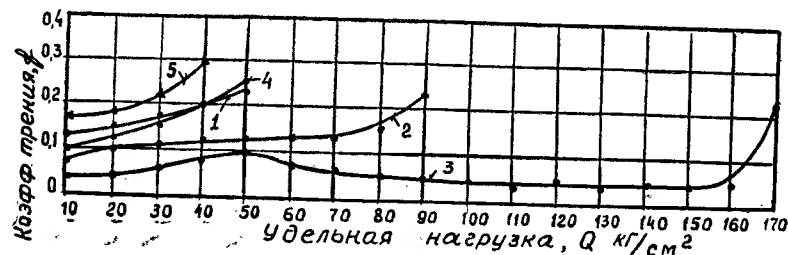


Рис. 2. Изменение коэффициента трения от удельной нагрузки ($Q, \text{кг/см}^2$, трение покрытие — бронза): 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575 \text{ кг/мм}^2$; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

Коэффициенты трения исследуемых пар демонстрируют также зависимость антифрикционных свойств покрытий от величины микротвердости. На рис. 2, 3 показан характер изменения коэффициентов трения от H_M и марки подшипнико-



Рис. 3. Изменение коэффициента трения от удельной нагрузки $Q, \text{кг/см}^2$ (трение покрытие — СОС6-6): 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575 \text{ кг/мм}^2$; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55; 6) $H_M = 630 \text{ кг/мм}^2$.

* Образцы имели твердость HRC 50—55.

вого материала. Покрытие с $H_M = 550 \text{ кг/мм}^2$ (рис. 2) соответствует минимальной по значению и почти не меняющийся от нагрузки коэффициент трения (кривая 3).

Относительное постоянство коэффициента трения при возрастающей нагрузке объясняется постоянным увеличением опорной поверхности от значения Q . Изнашивание в этих условиях одинаково изменяет микрогеометрию контактируемых поверхностей. Подобные закономерности просматриваются и у пар «покрытие — СОС6-6». Из анализа (рис. 2, 3) следует, что схватывание всех контактируемых пар происходит при скачкообразных изменениях коэффициентов трения ($f > 0,2$). Скачок означает, что пленочное (окислительное) изнашивание перешло к схватыванию поверхностей контакта. Отклонение величины микротвердости покрытий от оптимальных значений во всех случаях приводит к увеличению коэффициентов трения, и их скачок наблюдается при меньших значениях [18].

Коэффициенты трения пар «Сталь 45 (т. о.) — контртело» во всех случаях имели значения выше, чем покрытия оптимальной микротвердости с идентичными контртелами. Это говорит о том, что качество поверхностных пленок пар «Сталь 45 (т. о.) — контртело» значительно уступает пленкам, образующимся у покрытий. По этой причине можно ожидать и большую интенсивность износа (меньшую износостойкость) у пар, контактируемых ст. 45 (т. о.), HRC 50-55.

Коэффициенты трения покрытий с оптимальной микротвердостью имеют минимальные значения у сочетаний своих групп, но значительно отличаются в сравнениях между групповыми сочетаниями (табл. 3).

Таблица 3
Сравнительные данные коэффициентов трения у оптимальных сочетаний

Оптимальные сочетания «покрытие — подшипниковый металл»	Коэффициенты трения, f
Покрытие $H_{M50} = 500$ — СЧ15-32	0,080
Покрытие $H_{M50} = 550$ — БрОЦС6-6-4,5	0,060
Покрытие $H_{M50} = 400$ — АК-4	0,173
Покрытие $H_{M50} = 630$ — СОС6-6	0,086

При трении в подшипниковых узлах развиваются высокие температуры как результат упруго-пластических деформаций в зоне контакта. За счет теплопроводности сопряженных тел

нагрев распространяется вглубь. Величина температуры зоны контакта зависит от физико-механических свойств металлов и от параметров трения. Повышаясь от воздействия этих факторов, температура начинает оказывать существенное влияние на физико-механические свойства контактируемых пар, на величину и характер их изнашивания.

Нагревание трущихся тел неразрывно связано с деформациями и разрушением контактных точек в зоне трения. Тепловая энергия зоны контакта частично рассеивается в окружающую среду, часть отводится в образец и контртело, а часть рассеивается с продуктами износа.

Величина деформации, возникающая в процессе трения, и микротвердость покрытий принадлежат к основным источникам теплообразования, а наблюдаемые резкие повышения температуры* у исследуемых сочетаний пар свидетельствуют о наличии этой связи (рис. 4, 5).

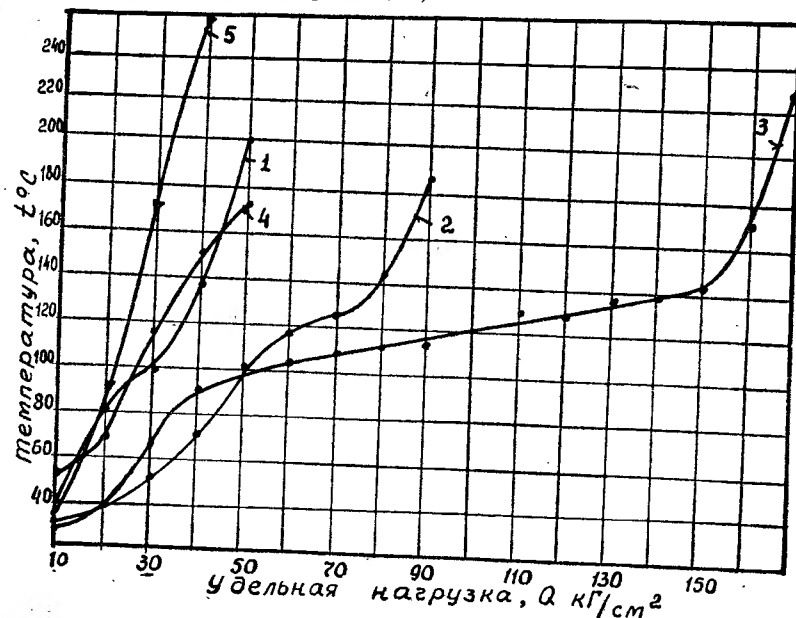


Рис. 4. Изменение температуры в околоконтактной зоне от Q (трение покрытие — БрОЦС6-6-4,5): 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575 \text{ кг/мм}^2$; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

* Температура измерялась термпарой ХК, ($\varnothing 0,1$) на расстоянии 1,2 мм от зоны контакта и регистрировалась электронным самописцем ЭПП—09МЗ.

Приращение температуры происходит более интенсивно в начальный период трения. При длительных испытаниях температура стремится к некоторому постоянству (рис. 5). Температура околоконтактной зоны более инерционна ($t^{\circ}\text{C}$), чем момент трения ($M_{тр}$). Эта зависимость характерна для всех сочетаний.

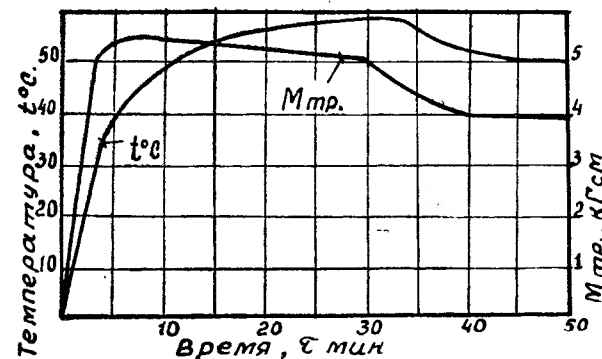


Рис. 5. Характерные изменения момента трения и температуры в околоконтактной зоне при приработке ($Q = 10 \text{ кг/см}^2$, трение покрытие $H_M = 610$ —СОС6-6).

Момент трения резко возрастает до максимума (на примере приработки «покрытие $H_M = 630$ —СОС6-6», $Q = 10 \text{ кг/см}^2$) и задерживается в этом положении некоторое время, а затем снижается до строго определенного неизменного значения (стабилизируется). Температура до максимального значения повышается медленно $\tau = 20$ —35 мин. Понижение температуры по сравнению с моментом трения задерживается на $\tau = 10$ —30 мин.

Запаздывание роста температур относительно момента трения объясняется интенсивным отводом тепла в начальный период из зоны контакта за счет теплопроводности материалов, составляющих пару трения. По этой причине идет медленное формирование теплового поля. Инерционность формирования температурного объемного поля характеризуется временем, необходимым для установления теплового баланса пары.

Полная стабилизация температуры в околоконтактной зоне и момента трения означает окончание формирования вторичных структур и фактической площади контакта. Это яв-

ление ни в коем случае не означает прекращения деформаций в контактной зоне.

Температура поверхностного слоя и температурный градиент существенно влияют на изменение механических свойств материалов, на значения коэффициентов трения и на характер изнашивания контактирующих поверхностей. Так, более

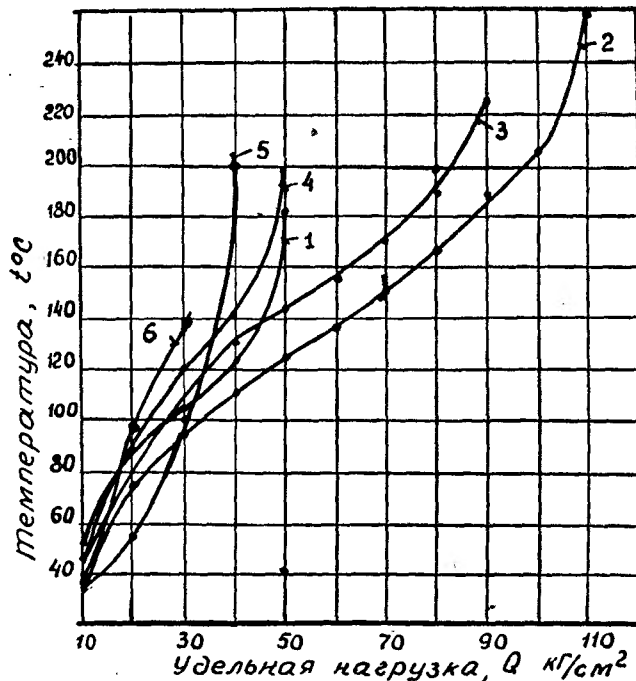


Рис. 6. Изменение температуры в околоконтактной зоне от Q (трение покрытие—АК-4): 1) $H_M=375$; 2) $H_M=400$; 3) $H_M=450$; 4) $H_M=500$ кг/мм²; 5) $H_M=550$ кг/мм²; 6) Сталь 45 (т. о.) HRC50-55.

плавный подъем температур наблюдается у сочетаний с оптимальной микротвердостью покрытий (рис. 6, кривая 2 и рис. 4, кривая 3), а сочетания с микротвердостью покрытий, отличной от оптимума, имеют резкий подъем температур (рис. 6, кривые 1, 4, 3, 5; рис. 4, кривые 2, 4, 1). Из данных (рис. 4 и 6) нетрудно сделать вывод, что с улучшением антифрикционных свойств сочетаний кривая подъема температур

приближается к оси абсцисс, а с ухудшением — к оси ординат. Величина температуры оказывает непосредственное влияние на критическую нагрузку схватывания. Если у оптимальных пар температура схватывания ($230-260^\circ\text{C}$) достигается при $Q=170$ кг/см² (рис. 4) и $Q=110$ кг/см² (рис. 6), то в других случаях это значение температуры получается при меньших Q . Из полученных результатов следует, что с повышением околоконтактной температуры схватывание контактирующих пар облегчается.

Наличие критических температур и критических удельных нагрузок схватывания при граничном трении связано с прочностью поверхностного слоя. Величина коэффициента трения и температура в околоконтактной зоне находятся в непосредственной взаимосвязи. С возрастанием коэффициента трения увеличивается работа сил трения и соответственно возникает больший подъем температуры. У металлов с высокими напряжениями под действием температурных полей напряжения снижаются. У электролитического железа это выражается в уменьшении величины микротвердости из-за рекристаллизации, которая начинается при объемной температуре свыше 200°C .

В сопряжениях «покрытие — Ст. 10» схватывание наступает при исходной нагрузке (10 кг/см²) через 20 мин работы пары. Температура в околоконтактной зоне не превышает 84°C . Схватывание носит характер налипания крупных частиц Ст. 10 на поверхность покрытий. Налипшие частицы имеют очень высокую микротвердость $H_M=1500$ кг/мм². Полученные результаты свидетельствуют о наличии малого энергетического барьера у сопряженных пар. Сопрягать малоуглеродистую сталь с электролитическим железом крайне нежелательно.

Проверка материалов других марок (СЧ12-24, СЧ18-36, БрОЦС6-6-3, БрОЦС5-5-5, АЛ-4, Д-1, АС) на схватываемость с покрытиями показала аналогичную закономерность, что и СЧ15-32, БрОЦС6-6-4,5, АК-4. В исследованиях были получены параметры трения одного порядка.

2. Взаимосвязь между параметрами трения и усредненной температурой на поверхности контакта

Исследования показали, что чем выше температура зоны контакта, тем интенсивнее изменяются физико-механические свойства покрытий.

В расчете были сделаны следующие допущения: 1) режим трения упорядоченный, и скорость изменения температуры во всех точках контртела постоянна; 2) расстояние от поверхности контакта до точки замера температуры постоянно; 3) вся площадь соприкосновения граничных пленок является тепловым источником; 4) доля теплоизлучения (при сравнительно низкой температуре около контактной зоны $t=200^\circ\text{C}$) весьма мала; 5) тепловой поток определяется конвективным теплообменом слоя смазки и теплопроводностью стенки; 6) поверхность контакта контртела рассматривается как стенка — углом обхвата пренебрегаем.

Из теплотехники известно, что количество теплоты, переносимое в единицу времени через единицу площади, определяется по закону Фурье:

$$q_\varphi = -\lambda \frac{dt}{dn_\varphi}, \quad (1-1)$$

где:

λ — коэффициент теплопроводности;

$\frac{dt}{dn_\varphi}$ — градиент температур в направлении нормали к поверхности.

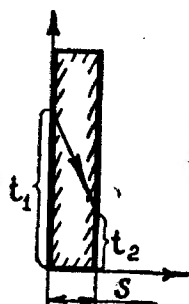


Рис 7. Расчетная схема.

Режим трения упорядочен. Толщина стенки мала по сравнению с наименьшей протяженностью поверхностей, образующих контртело. Температурные условия на поверхностях стенки равномерные, но неравные. Считаем, что температура внутри пластинки изменяется только по ее толщине (в направлении X (рис. 7)).

Примем $q_v = 0$, тогда по условию стационарности $\frac{dt}{d\tau} = 0$. Математическая теория теплопроводности базируется на дифференциальном уравнении (или уравнении Фурье):

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{C_\gamma} \left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dz^2} \right) + \frac{dv}{C_p}. \quad (1-2)$$

Из уравнения (1-2) имеем:

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{dt}{dx} = C_1. \quad (1-3)$$

Для всех исследуемых сочетаний $S = \text{const}$ и равно 1,2 мм. Коэффициент теплопроводности $\lambda = \text{const}$ только для каждой марки сопряженного металла контртела.

При граничных условиях:

$x=0$, тогда $t=t_1$;

при $x=s$ $t=t_2$.

Произведя подстановку (1-3), получим:

$$C_2 = t_1, \quad C_1 = \frac{t_2 - t_1}{S}. \quad (1-4)$$

Из выражения (1-1) имеем:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad \text{где:} \quad \frac{dt}{dx} = C_1;$$

подставив (1-4), после преобразований получим:

$$q = +\frac{\lambda}{S}(t_1 - t_2) \quad (1-5)$$

или

$$t_1 = q \frac{S}{\lambda} + t_2.$$

Величину единичного источника теплообразования при трении (q) определяем, воспользовавшись формулой Х. Блока:

$$q = \frac{fQV}{A \cdot 427} \cdot 1000, \text{ кал/сек}, \quad (1-6)$$

где

f — коэффициент трения;

Q — удельная нагрузка, кг/см^2 ;

V — скорость трения, м/сек ;

A — площадь единичного контакта;

427 — механический тепловой эквивалент.

Произведя подстановку (1-6) в уравнение (1-5), получим:

$$t_1 = 1000 \left(\frac{fQV}{A \cdot 427} \cdot \frac{S}{\lambda} \right) + t_2, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1-7)$$

Из расчетных данных (табл. 4) следует, что величина критических усредненных температур контакта, при которых про-

Таблица 4
Величины средних температур на поверхностях контакта при схватывании

Сочетание исследуемых пар		Средняя температура на поверхности контакта при схватывании, t °C
Марка материала контртела	Микротвердость покрытий, Н _М кг/мм ²	
СЧ15-32	450	213
	500	246
	550	246
	575	224
	Ст. 45 (т. о.)	183
АК-4	375	191
	400	263
	450	231
	500	201
	550	201
	Ст. 45 (т. о.)	140
БрОЦС6-6-4,5	450	201
	500	190
	550	231
	575	171
	Ст. 45 (т. о.)	231
СОС6-6	450	141
	500	131
	550	141
	575	151
	630	163
	Ст. 45 (т. о.)	161

исходит схватывание, наибольшее значение имеет у сочетаний с оптимальной микротвердостью покрытий. Эти покрытия устойчивы к температурным полям и повышенным температурам, мало чувствительны к величинам удельных нагрузок, имеют минимальные коэффициенты трения по сравнению с другими испытанными сочетаниями.

Работа от возникающих сил трения в основном переходит в тепло. Температура зоны контакта, достигнув определенных значений, начинает воздействовать на процесс изнашивания. Начальный рост температур способствует росту пластических деформаций и скорости диффузных процессов поверхностных слоев, что улучшает градиент механических свойств. С достижением зоны критических температур поверхностные слои начинают размягчаться и градиент механических свойств меняет знак (на отрицательный). Смена знака

градиента механических свойств приводит к прорыву поверхностных пленок, к освобождению ювенильных поверхностей, к увеличению взаимного внедрения поверхностей контакта.

3. Особенности прирабатываемости электролитического железа

Приработка влияет на свойства вторичных поверхностных структур, а от их качества зависит износостойкость сопряженных пар в условиях эксплуатации. Приработка характеризует начальную стадию износа, и продолжением ее является установившийся износ. Желательно свести к минимуму начальную стадию износа, довести до максимума установившуюся стадию износа и предупредить начало аварийного износа.

Под действием величин удельных нагрузок в зоне контакта трущихся пар возникают совместные касательные напряжения сдвига и нормальные напряжения контакта.

Топография поверхностей покрытий после механической обработки представляет собой выступы и впадины разнообразных геометрических форм и размеров. Поэтому начальный момент силового замыкания сопряжения связан с неравномерным распределением деформаций по глубине в точках контакта. Износ в этот период происходит по вершинам выступов и волн. Чем меньше высота выступов и волн (до определенных значений), тем больше площадь контакта, меньше величина удельного давления и соответственно меньше износ трущихся тел. Повышение удельных нагрузок при приработке создает условия увеличения нормальных напряжений и фактической площади контакта, а также возрастания числа единичных пятен контакта. С другой стороны, оно создает предпосылки к прорыву поверхностных пленок. Касательные напряжения сдвига в этом случае перераспределяют напряжения от контакта к контакту, что приводит к появлению остаточных деформаций на площадках контакта, если ранее они находились в режиме упругих деформаций.

Большое влияние на интенсивность развития пластических деформаций поверхностных слоев оказывает температура зоны контакта. При температуре, не достигающей критического значения схватывания, кислород воздуха насыщает поверхностные слои электролитического железа, образуя химические соединения Fe₂O₃ и Fe₃O₄. Эти соединения под воздействием деформаций и температур зоны контакта охрупчиваются при достижении определенной толщины и разрушаются.

ся. Затем идет обнажение следующих поверхностных слоев и совершается повторение цикла пленочного изнашивания.

Результаты исследований показывают, что зависимость времени приработки от значений величин удельных нагрузок имеет характерную общую закономерность для всех рассматриваемых сочетаний.

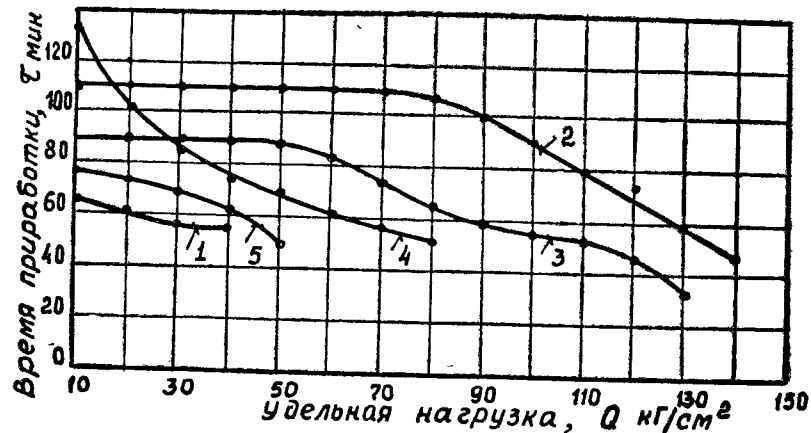


Рис. 8. Изменение времени приработки от Q (трение покрытие — СЧ15-32): 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575$ кг/см²; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

Покрываются при сопряжении с чугуном (рис. 8), прирабатываются быстрее, чем больше отклонение величины микротвердости от оптимальных значений (кривые — 1, 3, 4). С увеличением удельной нагрузки время приработки сокращается. У покрытий с оптимальной величиной микротвердости (кривая — 2) время приработки до $Q = 80$ кг/см² постоянно, а затем, с ростом Q и температур зоны контакта, начинает снижаться. Аналогичный характер приработки просматривается и у сочетаний «покрытие — СОС6-6» (рис. 9).

Другой характер времени приработки от (Q) просматривается у сочетаний «покрытие — АК-4» и «покрытие — БрОЦС6-6-4,5». Так, с увеличением удельных нагрузок (Q) покрытия с оптимальной микротвердостью (рис. 11, кривая — 3) имеют первоначальное резкое время сокращения приработки, далее оно относительно стабилизируется и начинает сокращаться только перед приближением к критическим удельным нагрузкам схватывания. У «покрытие — АК-4» устойчивое значение

времени приработки (рис. 10, кривая — 2) проявляется с исходных удельных нагрузок. Отклонение величины микротвердости покрытий от оптимальных значений у сочетаний «покрытие — АК-4» и «покрытие — БрОЦС6-6-4,5» во всех случаях приводит к увеличению времени приработки (рис. 10, кривые — 3, 1, 4, 5), (рис. 11, кривые — 1, 2, 4).



Рис. 9. Изменение времени приработки от Q (трение покрытие — СОС6-6): 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575$ кг/см²; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55; 6) $H_M = 630$ кг/мм².

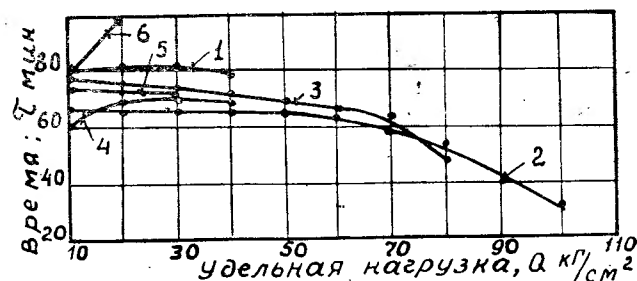


Рис. 10. Изменение времени приработки от Q (трение покрытие — АК-4): 1) $H_M = 375$; 2) $H_M = 400$; 3) $H_M = 450$; 4) $H_M = 500$ кг/мм²; 5) $H_M = 550$ кг/мм²; 6) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

На основе проведенного анализа следует вывод, что время приработки у сочетаний «покрытие — подшипниковый материал» не следует считать основным показателем без учета параметров трения (чувствительности к нагрузкам схватывания в условиях граничного трения, величины коэффициента трения и температуры околосконтактной зоны).

Линейной зависимости между величиной приведенного износа и возрастанием удельной нагрузки в условиях исследований обнаружено не было. Это, на наш взгляд, объясняется

непропорциональным изменением фактической площади контакта от величины удельной нагрузки. Несомненно, существенное влияние оказывают окисные пленки (Fe_2O_3 ; Fe_3O_4 ; MgO), которые при разрушении блокируют поверхности от непосредственного соприкосновения в зоне контакта.

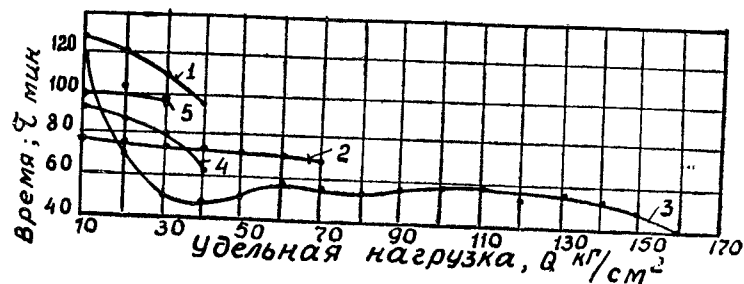


Рис. 11. Изменение времени приработки от Q (трение покрытие—БрОЦС6-6-4,5); 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575 \text{ кг/мм}^2$; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

В условиях опытов у каждого сочетания при приработке формировалась строго постоянная шероховатость поверхности (рис. 12). Наивысший класс чистоты поверхности устанавливался у покрытий с оптимальной величиной микротвердости. Во всех случаях отклонения величины микротвердости покрытий от оптимума шероховатость поверхности возрастала, класс чистоты поверхности снижался.

Относительно низкий класс чистоты поверхности формировался у покрытий при сопряжении с АК-4. Здесь, по всей видимости, сказывался абразивный характер окисных пленок алюминия.

Особенностью сплавов алюминия является способность быстрого окисления кислородом воздуха с образованием твердого тугоплавкого оксида Al_2O_3 . Температура плавления оксида Al_2O_3 — 2050°C , в то время как алюминиевые сплавы плавятся в основном при 675°C . Твердость Al_2O_3 имеет $H_M = 1200 \text{ кг/мм}^2$, близкую к твердости алмаза.

Влияние исходной чистоты поверхностей тел, сопряженных в подшипниковой паре, на начальную стадию износа доказано многими исследователями и сомнений не вызывает.

Для разработки производственных рекомендаций по исходной чистоте поверхностей покрытий были подготовлены серии образцов с оптимальной микротвердостью и различной шероховатостью.

Исходная чистота поверхности влияет на интенсивность износа (рис. 13) только в стадии приработки. Из анализа хода кривых (рис. 13,а) следует, что, примерно через 40 мин приработки, кривые становятся параллельными, и исходная шероховатость сказывается на износ только величинами отрез-

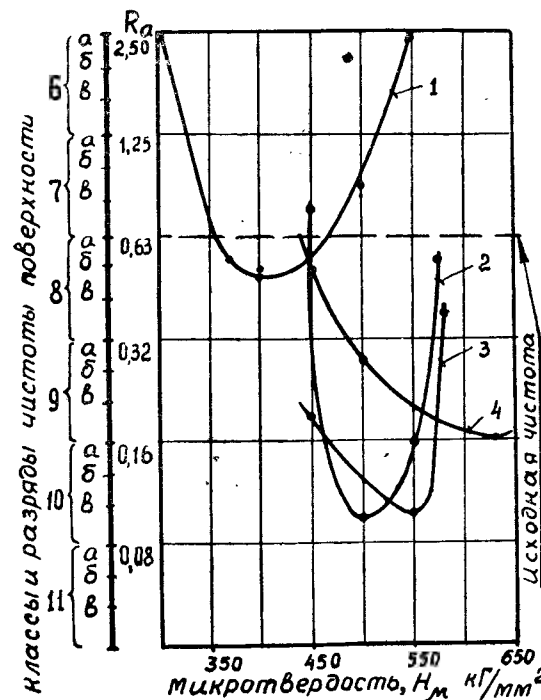
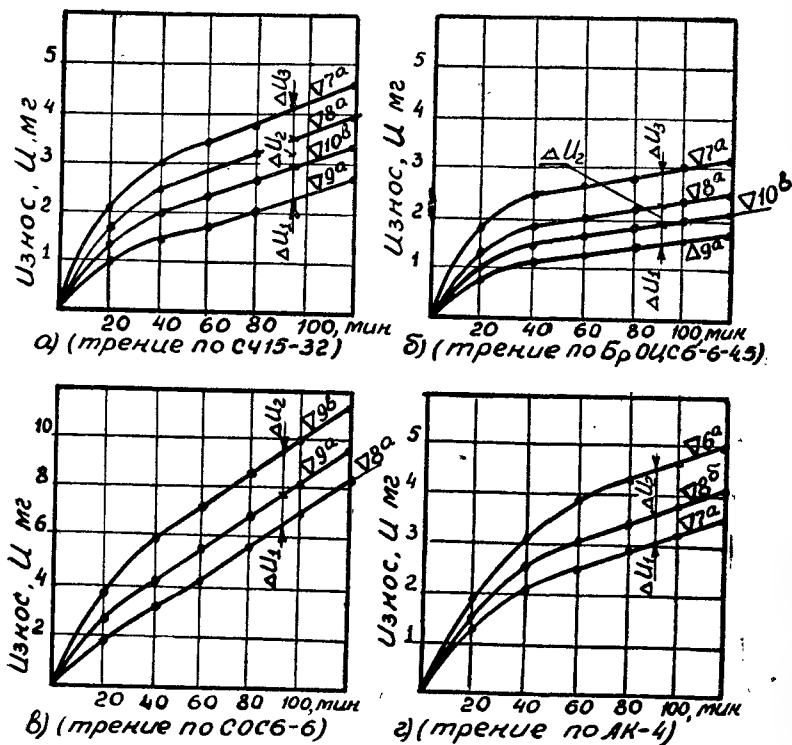


Рис. 12. Влияние H_M покрытий на формирование чистоты поверхности (трение: 1) АК-4; 2) СЧ15—32; 3) БрОЦС6-6-4,5; 4) СОС6-6).

ков U_1 , U_2 , U_3 . Наименьший износ у покрытий с чистотой поверхности $\nabla 9a$. Та же закономерность просматривается на рис. 13-б и 13-в, только со специфичным ходом кривых в каждом случае. Наиболее ощутимо влияние исходной шероховатости при сопряжении покрытий с СОС6-6 и АК-4 (рис. 13-в и рис. 13-г).

Из данных (рис. 13) следует, что при механической обработке нецелесообразно стремиться к оптимальной чистоте поверхности, получаемой в процессе приработки. Наиболее

экономично получить шероховатость поверхности на один-два разряда ниже оптимального класса чистоты. При трении пар чистота поверхности улучшится за короткое время, быстро сформируется строго определенный рельеф поверхности, и износ в этом случае будет небольшим.



Р и с. 13. Влияние исходной чистоты покрытий на интенсивность износа при приработке.

В случае резких отклонений от оптимальной чистоты поверхности покрытий будут грубыми. Контакт грубых поверхностей происходит на малом числе пятен с минимальной общей площадью. В процессе приработки неровности подлежат удалению и соответственно возрастает время приработки и величина начального износа.

Гладкие поверхности (чистота выше оптимальной) недостаточно хорошо адсорбируют смазку и имеют локальные мес-

та схватывания. Да и само получение таких поверхностей связано с большими нерациональными затратами труда.

На основе исследований стало возможно дать предварительные рекомендации по подготовке исходной чистоты поверхности покрытий, в зависимости от марки сопряженного материала (табл. 5) [19].

Таблица 5

Экономически целесообразная чистота покрытий после механической обработки

Сопряженный подшипниковый материал	Чистота покрытий после механической обработки	
	желательная	допустимая
Серые чугуны	9 _a	10 _a , 8 _б
Сплавы алюминия	7 _a	8 _a
Бронзы (типа ОЦС)	9 _a	10 _a , 8 _a
Сплав СОСб-6	8 _a	9 _a

4. Изнашиваемость электролитического железа

На существование оптимальной микротвердости у гальванических покрытий, при исследовании их на износостойкость, указывается рядом авторов. Так, о покрытиях электролитического хрома рассказывается В. Ф. Молчановым и К. А. Крыловым; сплав железо—никель для покрытий при трении очугунную колодку (СЧ24-44) в условиях полужидкостной смазки описывается в работах М. П. Мелкова, В. А. Бабенко, И. Е. Ключкина.

Установившийся эксплуатационный износ заключается в деформировании, разрушении и воссоздании на участках истинного контакта поверхности нового слоя с прежними стабильными свойствами.

Изнашиваемость всех исследуемых сочетаний оценивалась нами по циклам методом взвешивания. Длительность циклов испытания для каждого отдельного сочетания равнялась — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 км пути трения. Общий путь равнялся — 78 км. Условия трения были близки к граничным. В зону трения подавалась одна капля дизтоплива через 500 м пути. Уменьшение смазки приводило к неустойчивому режиму.

Изнашиваемость всех исследуемых сочетаний (рис. 14, 15, 16, 17) выражается общими закономерностями и похожим ходом кривых. Наименьшая изнашиваемость просматривается у покрытий с оптимальной микротвердостью (рис. 14,

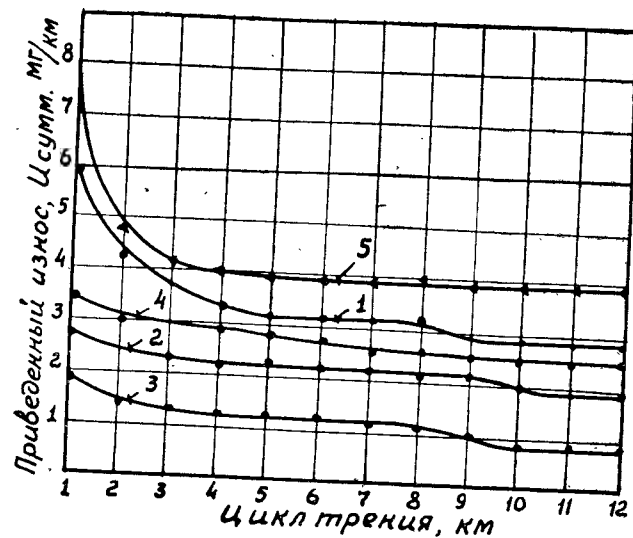


Рис. 14. Изменение интенсивности изнашивания от пути (трение по БрОЦС6-6-4,5); 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 575$ кг/мм²; 5) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

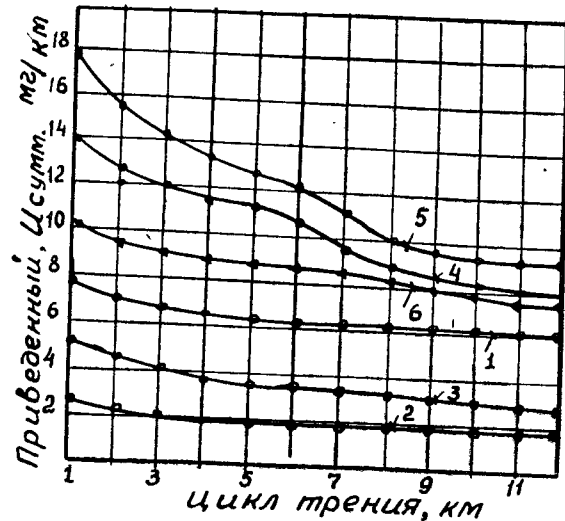


Рис. 15. Изменение интенсивности изнашивания от пути (трение по АК-4); 1) $H_M = 375$; 2) $H_M = 400$; 3) $H_M = 450$; 4) $H_M = 500$ кг/мм²; 5) $H_M = 550$ кг/мм²; 6) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

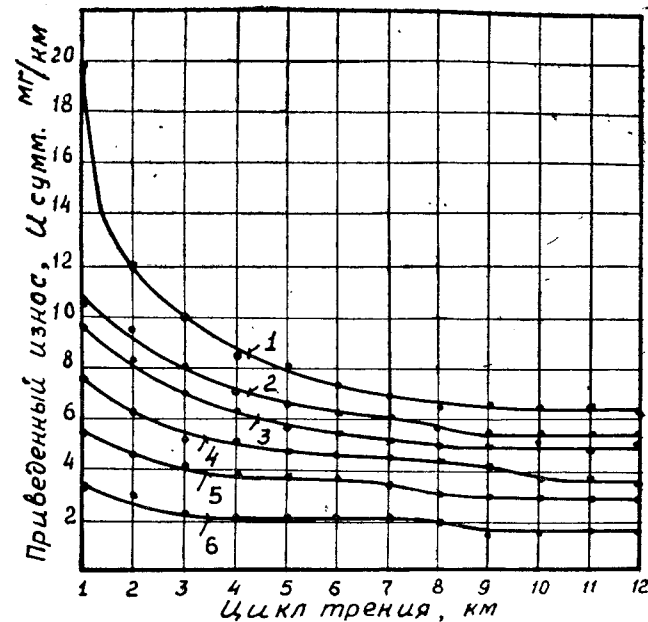


Рис. 16. Изменение интенсивности изнашивания от пути (трение по СОС6-6):

- 1) $H_M = 450$; 2) $H_M = 500$; 3) $H_M = 550$; 4) $H_M = 500$ кг/мм²; 5) $H_M = 550$ кг/мм²; 6) Сталь 45 (т. о.) HRC50—55.

кривая — 3; рис. 15, кривая — 2; рис. 16, кривая — 6; рис. 17, кривая — 2). В условиях изнашиваемости опытных пар просматривается твердостная закономерность, описанная ранее. Отклонение величины микротвердости покрытий от оптимальных значений приводит, без исключений, все сопряжения к повышению изнашиваемости.

Термически обработанная сталь 45 (HRC50—55) в сочетании с исследуемыми материалами по причине худших антифрикционных свойств, по сравнению с покрытиями, имеет наибольшую изнашиваемость. Исключение составляет сочетание «Сталь 45 (т. о.) — СОС6-6», у которого изнашиваемость приближается к покрытию с оптимальной микротвердостью (рис. 16, кривая — 5).

Из результатов (табл. 6) следует, что износостойкость покрытий очень чувствительна к изменениям величины микротвердости.

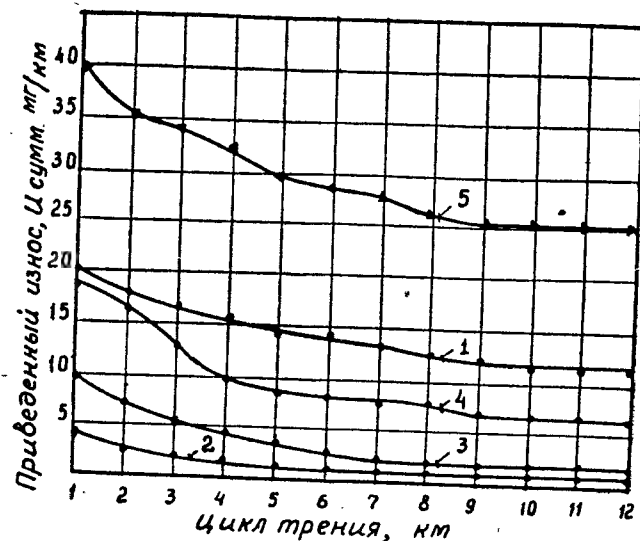


Рис. 17. Изменение интенсивности изнашивания от пути (трение по СЧ15-32).

Сравнительная, относительная износостойкость исследуемых сочетаний

Исследуемые сочетания		Величина сравнительной, относительной износостойкости
подшипниковый материал	покрытия с микротвердостью H_M кг/мм ²	
СЧ15-32	$H_M = 500$ (опыт.)	16,0
	$H_M = 550$	15,0
	$H_M = 575$	8,0
	$H_M = 450$	2,1
БрОЦС6-6-4,5	$H_M = 550$ (опыт.)	3,7
	$H_M = 575$	1,8
	$H_M = 500$	2,0
	$H_M = 450$	1,3
АК-4	$H_M = 400$ (опыт.)	4,20
	$H_M = 450$	3,90
	$H_M = 500$	0,87
	$H_M = 375$	1,4
СОС6-6	$H_M = 630$ (опыт.)	1,57
	$H_M = 575$	0,72
	$H_M = 550$	0,55
	$H_M = 500$	0,46
	$H_M = 450$	0,36

На рис. 18, 19 для примера показана зависимость параметров трения от микротвердости покрытий. Покрытиям с оптимальной величиной микротвердости во всех исследуемых сочетаниях соответствовали минимальные коэффициенты трения и минимальные значения температур в околоконтактной зоне. Отклонение микротвердости покрытий от оптимума способствует росту параметров трения.

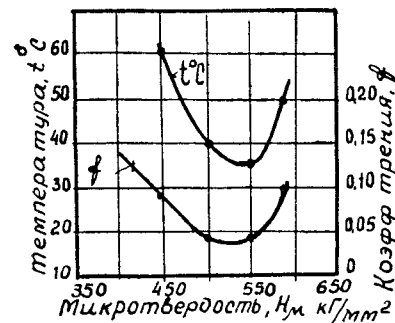


Рис. 18. Изменение параметров трения от H_M покрытий (трение по БрОЦС6-6-4,5).

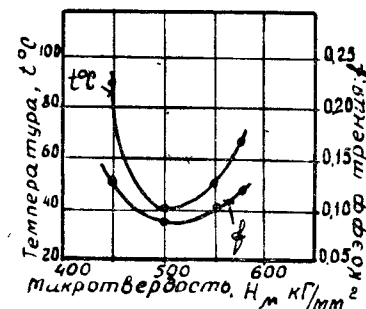


Рис. 19. Изменение параметров трения от H_M покрытий (трение по СЧ15-32).

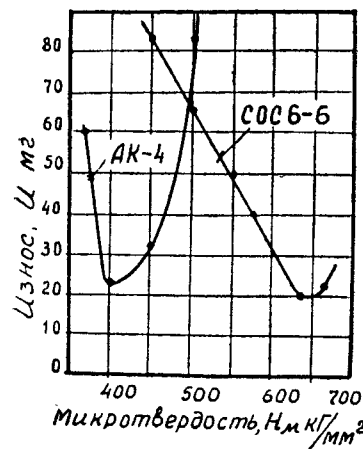


Рис. 20. Влияние H_M покрытий на величину износа (трение по АК-4 и СОС6-6).

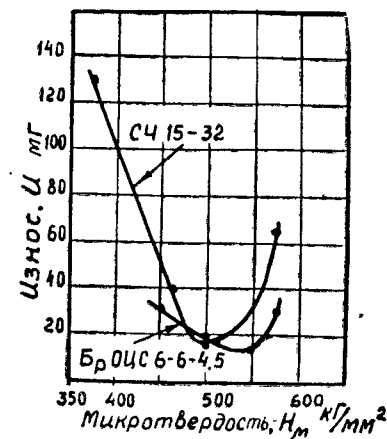


Рис. 21. Влияние H_M покрытий на величину износа (трение по СЧ15-32 и БрОЦС6-6-4,5).

Износ — следствие трения и происходящих процессов в зоне контакта при сопряжении двух тел. Динамика износа характеризует постепенное накопление факторов, которые исчерпывают в отдельных микрообъемах контактных поверхностей способности к дальнейшим пластическим деформациям. На рис. 20 и 21 приведены результаты по износу, полученные на 12 цикле испытаний. Характер кривых износа еще раз подтверждает необходимость сопрягать в трущейся паре только покрытия со строгим значением величины микротвердости. Из кривых (рис. 20, 21) следует, что только незначительные отклонения величины микротвердости допустимы без ярко выраженной интенсификации износа.

Таблица 7

Пределы отклонений оптимальной микротвердости покрытий

Марка сопряженного подшипникового материала	Величина микротвердости покрытий, $H_M, \text{кг/мм}^2$
Серые чугуны	500—525
Оловянно-свинцовые бронзы	550—525
Алюминиевые сплавы	400—425
Сплав СОС6-6	610—630

Из данных исследований видно, что высокие антифрикционные свойства и высокую износостойкость имеют покрытия с оптимальной микротвердостью. Отклонение от оптимальной микротвердости у покрытий допускается в незначительных пределах (табл. 7).

5. Взаимодействие поверхностных пленок у сопряжений «покрытие — подшипниковый материал»

Высокие антифрикционные свойства электролитического железа, выявленные в настоящих исследованиях, обусловлены двумя причинами: 1) некоторыми компонентами, входящими в подшипниковые материалы; 2) быстрой окисляемостью электролитического железа кислородом, содержащимся в окружающей среде.

У серых чугунов при сопряжении с покрытием электролитического железа антифрикционные свойства повышает находящийся в свободном состоянии графит. В процессе трения микрообъемы металлических структурных составляющих чу-

гуна пластически деформируются, вытесняя тем самым графит на поверхность контакта.

Исследуемые оловянно-свинцовистые бронзы имели неоднородную структуру, представляющую собой игольчатые и кубические кристаллы, погруженные в свинец. Свинец образует в структуре этих бронз буферный слой в зоне контакта. По данным многих исследователей, продукт износа свинца при определенных условиях трения представляет собой мелкие частицы коллоидного характера, которые позволяют увеличить нагрузку масляного слоя в условиях граничного трения и снижают величину коэффициента трения.

Сплав СОС6-6 имеет высокую пластичность вследствие пониженного содержания олова и сурьмы. В сплаве нет крупных кристаллов и хрупких соединений, а составляющая свинца улучшает его антифрикционные свойства.

В сплавах алюминия антифрикционные свойства улучшает входящий в сплав компонент магний. Магний в процессе трения образует мягкие соединения MgO , которые в основном не оказывают абразивного действия. Эти соединения при разрушении образуют мелкие дисперсные частицы, которые пластифицируют поверхность трения.

С целью выяснения закономерностей, обеспечивающих высокую антифрикционность электролитического железа, были проведены металлографические исследования поверхностей трения. Химический состав продуктов износа изучался методом качественного микрохимического анализа по методике И. В. Коренмана. Седиментация продуктов износа исследовалась на МИМ-8 с помощью конуса Тиндаля.

Во всех случаях у пар трения образовывался продукт износа, который частично удалялся из зоны контакта вместе со смазкой, а частично оставался на поверхности и принимал участие в трении. При увеличении подачи количества смазки в зону контакта скорость выноса продуктов износа возрастала.

После окончания приработки количество смазки изменяли с 20 капель в минуту до 60. Обнаруживался почти сразу рост параметров трения. Коэффициент трения возрастал на 5—8%, температура околосконтактной зоны повышалась на 6—10%. С уменьшением количества смазки до исходного (20 капель в минуту) параметры возвращались к первоначальным значениям, но за разный промежуток времени (от 50 сек до 5 мин). На время возврата оказывало влияние сочетание материалов, составляющих контактную пару.

Аналогичные явления возникали и при испытании трущихся пар на изнашиваемость. Внесение в зону контакта не одной, а двух капель смазки на 500 м пути приводило к изменению параметров трения. Однако характер изменения параметров был несколько иным, чем при приработке. При повышении количества смазки прослеживалось четыре отчетливо выраженных периода (рис. 22). Первый период (τ_1) — время

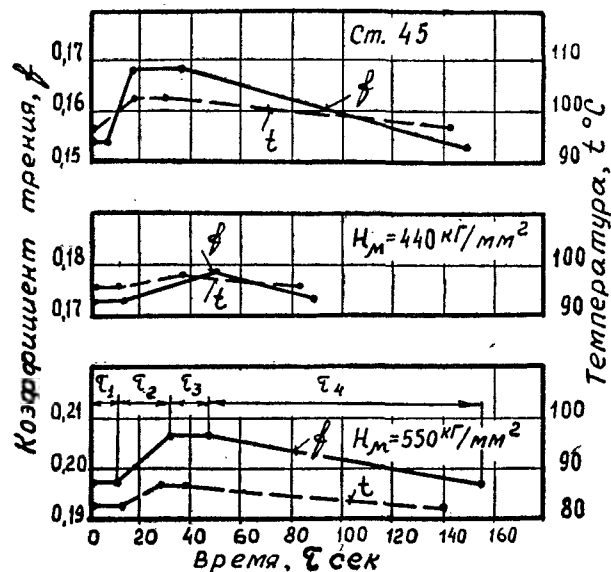


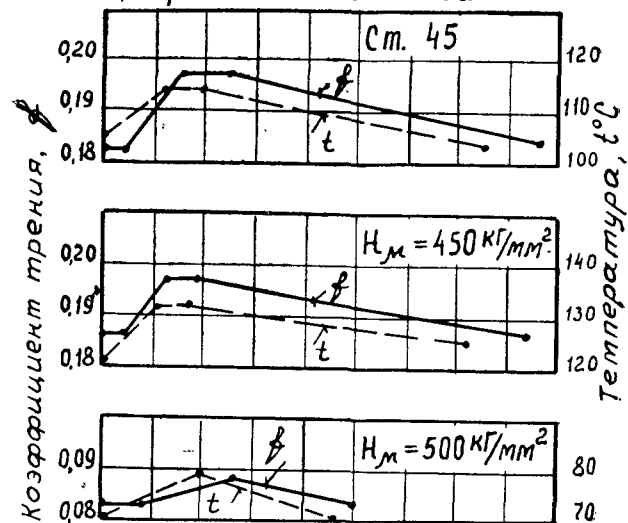
Рис. 22. Проявление контактного эффекта при трении покрытий со сплавами алюминия.

задержки изменения параметров трения после внесения повышенного количества смазки. Второй период (τ_2) — время возрастания параметров. Третий период (τ_3) — время задержки изменения параметров при переходе к исходному количеству смазки. Четвертый период (τ_4) — время снижения параметров до исходных значений.

Для краткости изложения результаты исследований описываются по одной марке подшипникового материала из каждой исследуемых серий.

У сочетаний с оптимальной микротвердостью (рис. 22, кривая — 2; рис. 23, кривая — 3-а и 3-б) покрытий наблюдаются наибольшие периоды τ_1 , τ_2 ($\tau_1=10$ сек., $\tau_2=36-40$ сек.).

а) Трение по СЧ15-32



б) Трение по Бр04С6-6-4,5

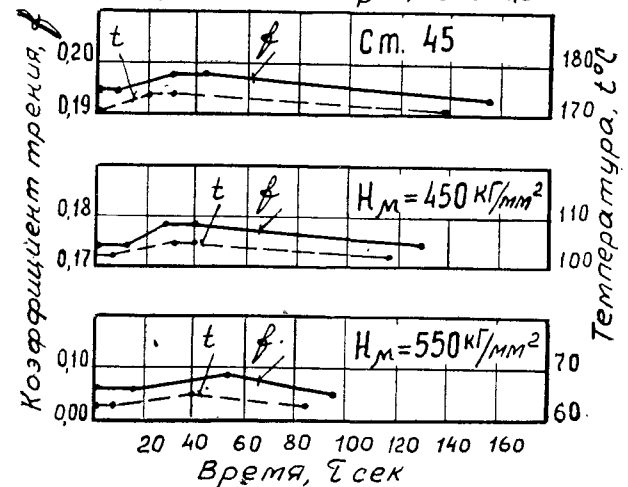


Рис. 23. Проявление контактного эффекта при трении покрытий с чугуном и бронзой.

$\tau_3 = 0$ и наименьший период $\tau_4 = 60-70$ сек по изменению величины коэффициента трения (f).

Температура околоконтактной зоны (t) более чувствительна к изменению условий смазки, чем коэффициент трения (f). Это свидетельствует о том, что отклонение режима смазки от граничных условий, в первую очередь, сказывается на величине упруго-пластических деформаций, а запаздывание изменения коэффициента трения показывает, что для качественной перестройки вторичных структур необходимо определенное время (τ). Отклонение микротвердости от оптимальных значений в любую сторону приводит к уменьшению τ_1 и τ_2 , к возрастанию τ_3 ($\tau_3 > 0$) и τ_4 .

Исследования сочетаний «СТ.45HRC 50-55 — подшипниковый материал» показали, что изменение количества смазки для них более чувствительно, чем для сочетаний с покрытиями неоптимальной микротвердости. Сочетания со Ст. 45H C50-55 быстрее выводятся из установившегося режима работы (τ_1 , τ_2 резко сокращаются) и относительно медленно восстанавливают исходные параметры со стабилизацией режима смазки.

Химический анализ износа показал, что на трущихся поверхностях в основном образуются два окисла Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . У сочетаний с оптимальной микротвердостью покрытий преобладает окисел Fe_3O_4 . Отклонение величины микротвердости покрытий от оптимальных значений способствует увеличению количества окисла Fe_2O_3 и уменьшению количества окисла Fe_3O_4 .

Анализ структурных составляющих продуктов износа показал, что они в преобладающем большинстве представляют собой полидисперсную систему. Во времени наблюдалось расслаивание этой системы на высококонцентрированный слой дисперсной фазы и слой дисперсионной среды. Размеры дисперсных частиц колебались от 0,1 мкм до 20—50 мкм. Частицы 0,1÷1 мкм в большем количестве образовывались при трении покрытий оптимальной микротвердости. У покрытий неоптимальной микротвердости наблюдалось укрупнение частиц износа (до размеров, видимых простым глазом), а количество мелких частиц значительно сокращалось.

Основным поставщиком мелких дисперсных частиц являлся окисел Fe_3O_4 , частицы которого обладают большой поверхностной энергией и имеют отрицательный заряд.

Поставщиком крупных частиц были частицы вырванного металла из поверхностей трения и частицы разрушенных по-

верхностных слоев трущихся пар от усталостных явлений изнашивания.

Любая система, в том числе и дисперсная, стремится, согласно второму закону термодинамики, к состоянию с минимальной свободной энергией. Это достигается системой путем сокращения суммарной поверхности или адсорбции дисперсных частиц на поверхности трения, как в исследуемых случаях. Адсорбировавшиеся на поверхности трения дисперсные частицы подчиняются закону диффузии, который проявляется в том, что частицы из зоны с большей концентрацией (зона контакта) переносятся к месту с меньшей их концентрацией. Процесс этот необратим и заканчивается равновесным состоянием, которое представляет собой равномерное распределение частиц по всей поверхности трения. На законе диффузии основано явление «самозатягивания» поверхностных слоев смазки при их «прорыве» в процессе трения.

Наружные поверхности металлов, в том числе и электролитического железа, имеют на границе раздела металл — окружающая среда избыточную энергию, которая является одной из форм свободной энергии. Под влиянием ее и процесса диффузии дисперсные частицы, адсорбируясь на поверхности трения, заполняют микровпадины, чем увеличивают фактическую площадь контакта, стремясь равномерно покрыть всю поверхность. Дисперсные частицы «блокируют» поверхности трения от непосредственного контакта и образуют протекторную механическую смазку. При сдвиге пристенных слоев в процессе трения дисперсные частицы совместно со смазкой образуют полимолекулярные слои.

Крупные частицы (более 5 мкм), оставшиеся на поверхности трения, нарушают кинетическую устойчивость коллоидной системы, что проявляется в значительном ослаблении диффузных процессов на поверхностях покрытий неоптимальной микротвердости. Качество протекторной смазки ухудшается, поддержание полимолекулярных слоев смазки становится затруднительным.

Внесение увеличенного количества капель смазки в зону трения у сочетаний с оптимальной микротвердостью покрытий требует времени для начала изменения дисперсионной среды — τ_1 . Далее начинается перестройка коллоидной системы, которая совершается относительно медленно из-за уменьшения поверхностного натяжения (эффект А. П. Ребиндера) и снижения пептизации, дисперсионной фазы — период τ_2 . Количество частиц на поверхности трения уменьшается, и, как ре-

зультат этого, наблюдается возрастание параметров трения. Уменьшение количества смазки до исходного приводит к быстрому накоплению дисперсионных частиц за счет пленочного изнашивания, на что показывает отсутствие периода τ_3 ($\tau_3=0$) и сокращение периода τ_4 . Величина периода τ_4 показывает, что накопление дисперсных частиц и восстановление свойств исходной коллоидной системы у сочетаний с оптимальной микротвердостью покрытий происходит довольно быстро (рис. 22, кривая — 2; рис. 23, кривые — 3-а и 3-б).

Трение покрытий неоптимальной микротвердости и Ст. 45HRC 50—55 сопровождается образованием в большом количестве крупных частиц износа, которые сообщают коллоидной системе кинетически неустойчивый характер и приводят к ослаблению диффузных процессов. Поэтому с увеличением количества смазки коллоидная система быстро качественно изменяется (период τ_1 имеет малую величину), толщина протекторной смазки, ввиду небольшого количества дисперсных частиц размерами 0,1—1 мкм, становится меньше и худшего качества. Крупные частицы, оставшиеся на поверхностях трения, оказывают абразивное воздействие на характер изнашивания.

Кроме роста параметров трения, в опытах наблюдалось значительное возрастание износа. Период τ_2 относительно мал по величине, что свидетельствует о большой чувствительности этих сочетаний к изменениям условий трения и о невысоком качестве образовавшейся на поверхностях контакта протекторной смазки. При переходе к исходному количеству смазки (период τ_3) требуется более длительное время для насыщения поверхностного слоя мелкими дисперсионными частицами продуктов износа. Затянутым (почти в 2 раза) является и процесс восстановления исходных параметров трения (τ_4).

Замечено в процессе опытов, что с уменьшением твердости подшипниковых материалов возрастает величина оптимальной микротвердости покрытий и уменьшаются явления контактного эффекта. У сочетаний «покрытие — СОС6-6», «Ст. 45HRC50—55—СОС6-6» явления контактного эффекта обнаружены не были. По нашему мнению, такое поведение указанных сочетаний объясняется высокой пластичностью сплава СОС6-6 и его способностью поглощать частицы продуктов износа.

Закономерности образования на трущихся поверхностях электролитического железа частиц грубых дисперсий микрогетерогенной системы, образующих протекторную механиче-

скую смазку, установленные автором в процессе исследований, позволяют ответить положительно на возможность повышения долговечности восстановленных деталей машин осталиванием.

6. Работоспособность покрытий оптимальной микротвердости, полученных из электролитов различной концентрации

Покрытия были получены из хлористых электролитов — как широко применяемых в производстве восстановления деталей, так и прошедших лабораторные опробования (табл. 8). Катодная плотность тока (D_k) выбиралась из условий получения покрытий с оптимальной величиной микротвердости.

Таблица 8

Составы электролитов					
Условные обозначения	С о с т а в, г/л				Температура t °C
	FeCl ₂ ·4H ₂ O	NiCl ₂ ·6H ₂ O	AcCl ₃ ·6H ₂ O	HCl	
1—1	200	—	—	1	80
2—1	300	—	—	1,5	75
2—2	300	30	—	2—3	75
2—3	300	—	55	1	75
3—1	450	—	—	1	80
4—1	680	—	—	1	80

Исследования показали, что прочность несущих поверхностных слоев покрытий не одинакова и зависит от условий их получения (табл. 9).

Так, покрытия, полученные из электролитов средних концентраций (2—1), (3—1), менее чувствительны к величинам удельных нагрузок, чем покрытия, полученные из электролитов малой (1—1) и высокой (4—1) концентраций.

Рассмотрим явления схватываемости трущихся пар на примере первой группы сочетаний. Наибольшую величину удельной нагрузки, при которой проявилась схватываемость ($Q=150$ кг/см²), имеют покрытия, полученные из электролита (2—1). Покрытия, полученные из электролита (3—1), имеют $Q=140$ кг/см². Покрытия, полученные из мало- (1—1) и высококонцентрированных (4—1) электролитов имеют соответственно $Q=120$ кг/см² и $Q=80$ кг/см².

Таблица 9

Чувствительность поверхностных слоев к Q

№№ сечений	Серии покрытий	Сопряженная пара		Удельная нагрузка схватывания, Q кг/см ²
		материал контртела	покрытие, Нм, кг/мм ²	
I	1—1	СЧ15-32	500	120
	2—1		500	150
	2—2		500	130
	2—3		500	70
	3—1		500	140
	4—1		500	80
II	1—1	БрОЦС6-6-4,5	550	110
	2—1		550	170
	2—2		550	90
	2—3		550	100
	3—1		550	170
	4—1		550	140
III	1—1	АК-4	400	80
	2—1		400	110
	2—2		400	30
	2—3		400	40
	3—1		400	110
	4—1		400	100

Аналогичный характер просматривается и у сочетаний групп два и три, только несущая способность поверхностей несколько больше у покрытий, полученных из электролита (4—1), по сравнению с покрытиями, полученными из электролита (1—1). Полученные результаты имеют хорошую сходимость с данными И. М. Мелковой [12].

Покрытия, полученные из электролита (2—2), представляют собой гальванический сплав Fe—Ni. В зависимости от условий ($t=60^\circ, 75^\circ, 90^\circ\text{C}$) и режимов электролиза ($D_k=5 \div 100 \text{ а/дм}^2$), количество никеля в сплаве изменяется (рис. 24). С увеличением температуры (кривая — 3) выход по току никеля (α_k^{Ni}) возрастает. Катодная плотность тока (D_k) оказывает обратное влияние. Так, при меньших значениях D_k выход по току Ni в сплаве больше. Увеличение D_k до 15 а/дм^2 приводит к резкому снижению Ni в сплаве. Дальнейшее увеличение D_k незначительно сказывается на снижении α_k^{Ni} .

Включение Ni в покрытия электролитического железа несколько изменяет его твердость и увеличивает пластичность поверхностных слоев при трении. По этой причине в условиях исследований наблюдается схватываемость покрытий, полу-

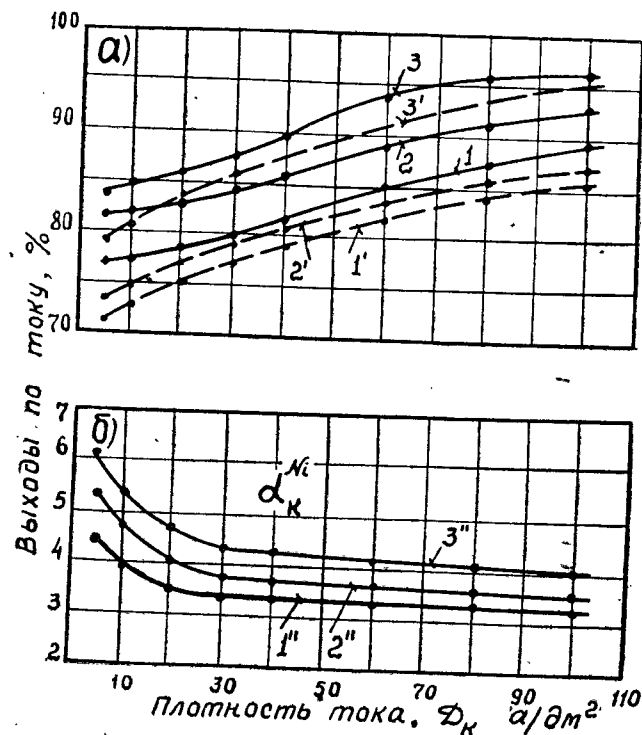


Рис. 24. Изменение выхода по току металла в зависимости от D_k и $t^\circ\text{C}$. Электролит: $300 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O} + 30 \text{ г/л NiCl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ г/л HCl}$; 1) $t=60^\circ\text{C}$; 2) $t=75^\circ\text{C}$; 3) $t=90^\circ\text{C}$; 1, 2, 3, — α_k^{Ni} , 1', 2', 3' — α_k^{Fe} , 1'', 2'', 3'' — α_k^{Wt} .

ченных из электролита (2—2), при меньших величинах удельных нагрузок, чем покрытия, полученные из хлористых электролитов без добавок.

При трении сопряжений «покрытие (Fe—Ni) — серый чугун» с разным содержанием Ni в покрытии (рис. 25), следует, что увеличение Ni до 4% незначительно повышает изнашиваемость. Увеличение Ni более 4% интенсифицирует скорость изнашиваемости. Такая же закономерность изнашиваемости покрытий с разным содержанием никеля получена при их сопряжении с оловянно-свинцовистыми бронзами.

Сплавы алюминия показали большую чувствительность к количественному содержанию Ni в покрытиях. При содер-

жании Ni в покрытиях более одного процента пары «Fe — Ni — АК-4» схватывались при исходной нагрузке ($Q = 10 \text{ кг/см}^2$), и дальнейшая работа опытной пары была невозможной. Причиной таких явлений, судя по литературным источникам, являлся близкий энергетический барьер у Ni и Al.

Микроструктурный и рентгеноструктурный анализы показали, что включение Ni в электролитическое железо до 3,5—4% Ni способствует незначительному возрастанию внутренних напряжений второго рода, микротвердости покрытий и количеству посторонних включений.

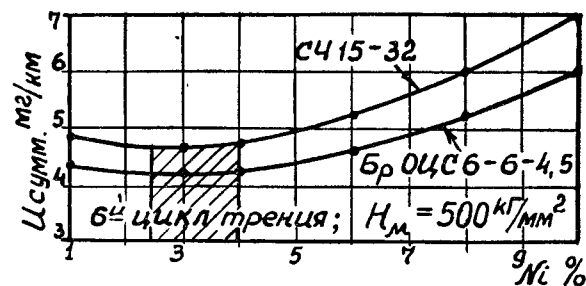


Рис. 25. Влияние процентного содержания Ni в сплаве на износ трущейся пары.

Содержание Ni в покрытиях более 4% значительно увеличивает пластичность покрытий, но одновременно увеличивает включение гидроокиси и водорода, которые способствуют разрушению покрытий, затормаживают движение дислокационных полей и концентрируют их в отдельных местах. Скопление энергии находит выход в образовании новых и росте имеющихся трещин. Этим представляется возможным объяснить невысокий рост микротвердости покрытий при значительном повышении внутренних напряжений II рода. Содержание Ni в покрытиях до 4% оказывает менее существенное влияние на процесс формирования вторичных структур при трении сопряженных поверхностей, чем дальнейшее его повышение. При содержании Ni более 4% в покрытиях качественно изменяется структура сплава Fe—Ni и, как следствие этого, растет изнашиваемость покрытий.

Введение в хлористый электролит Ni увеличивает защелачивание прикатодного слоя. Для устранения этого явления следует поддерживать кислотность электролита в пределах

$1,5 \div 3,0 \text{ г/л HCl}$. Снижение HCl ниже $1,5 \text{ г/л}$ приводит к ярко выраженной слоистости осадка за счет гидроокиси. Увеличение гидроокиси в покрытиях способствует росту явлений абразивного изнашивания, что значительно снижает износостойкость восстановленных поверхностей деталей.

Электролит 2—3 предложен [10] с целью улучшения технологических показателей гальванического процесса — получение качественных покрытий при невысокой ($\text{pH} = 2,6$) кислотности. Хлористый алюминий снижает интенсивность образования и адсорбции гидроокиси на поверхности катода, а также активизирует воздействие водорода в начальный период электролиза.

Покрытия из электролита (2—3) получаются сильно трещиноватыми. Сетка трещин очень частая и мелкая. Микротвердость $H_m = 500 \text{ кг/мм}^2$ получается при $D_k = 15 \text{ а/дм}^2$, в то время как из простого электролита (2—1) аналогичная микротвердость получается при $D_k = 30 \text{ а/дм}^2$. Это явление обуславливается, предположительно, образованием в прикатодной зоне комплексных солей алюминия, которые создают большие перенапряжения при осаждении ионов железа.

Покрытия, полученные из электролита (2—3), имеют высокую чувствительность поверхностных слоев к величинам удельных нагрузок. Схватываемость этих покрытий наступала при относительно низких нагрузках, по сравнению с другими исследуемыми сочетаниями. Продукт износа содержал крупные включения частиц покрытий. От возникающих пластических деформаций при трении покрытия из-за хрупкости быстро разупрочнялись от явлений «перенаклепа». Взаимодействие продуктов износа в зоне контакта с поверхностями трения носило абразивный характер, что и служило причиной снижения несущей способности поверхностных слоев.

Явления схватываемости возникали у всех исследуемых сочетаний при достижении строго определенных температур, установленных ранее. Поясним это на примере сопряжения «покрытие — Бр ОЦС 6-6-4,5» (рис. 26). Из анализа данных можно сделать вывод, что чем выше нечувствительность трущейся пары к возрастанию удельных нагрузок, тем плавнее, монотоннее идет рост температур в околоконтактной зоне (рис. 26, кривые 2—1, 3—1). У этих пар и наиболее низкие значения коэффициентов трения (рис. 27, кривые 2—1, 3—1). Постоянство коэффициентов трения означает пропорциональное увеличение фактической площади контакта с ростом Q . У пар, чувствительных к величинам удельных на-

грузок (рис. 26, кривые 2—2, 2—3, 1—1), рост температур интенсифицируется пропорционально величине Q . Коэффициенты трения у этих пар имеют сравнительно высокие значения (рис. 27, кривые 2—2, 2—3, 1—1).

Мерой стойкости покрытий против схватываемости является способность поверхностных слоев сопротивляться упруго-пластическим деформациям при трении и в то же время достаточно быстро формировать вторичные структуры.

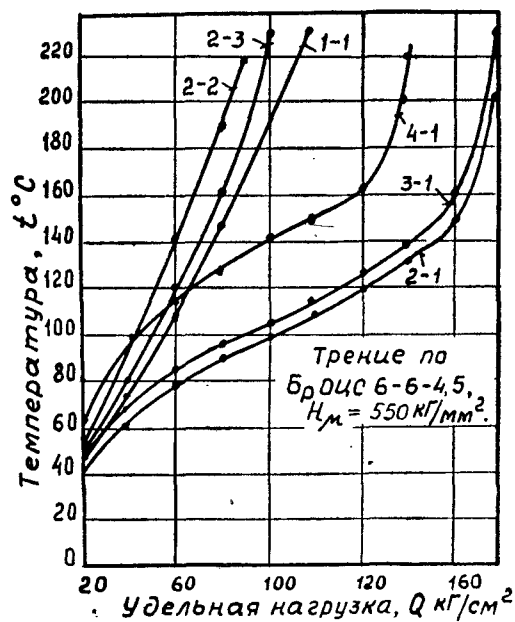


Рис. 26. Влияние Q на температуру околоконтактной зоны.

Стабильность параметров трения при данных условиях показывает окончание формирования фактической площади касания. Формирование вторичных структур у контактирующей пары закончено, и износ поверхностей стал постоянным во времени.

Влияния удельной нагрузки на процесс трения у исследуемых сочетаний выражаются по-разному (рис. 28). При сопряжении с чугуном, бронзой, алюминиевым сплавом покрытия с повышенной пластичностью прирабатываются дольше

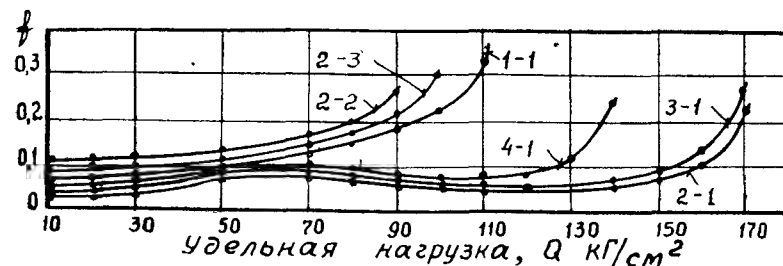


Рис. 27. Влияние Q на коэффициенты трения (трение по БрОЦС6-6-4,5; микротвердость покрытий $H_m = 550 \text{ кг/мм}^2$).

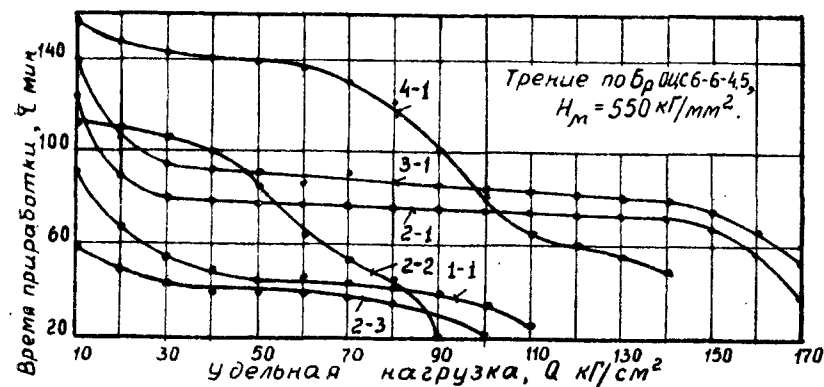


Рис. 28. Изменение времени приработки по ступеням нагрузок (трение по БрОЦС6-6-4,5).

(рис. 29, 30, кривые 4—1), чем другие покрытия. Причина объясняется затруднениями образования опорных поверхностей, что приводит к увеличенному времени приработки на каждой ступени нагрузок. Покрытия с повышенной хрупкостью (рис. 28—30, кривые 2—3, 1—1) прирабатываются с наименьшим временем по каждой ступени нагрузок. Формирование опорных поверхностей у этих покрытий происходит быстро за счет более дефектной структуры.

Покрытия, полученные из среднеконцентрированных электролитов (2—1), (3—1), занимают промежуточное значение по времени приработки (рис. 28—30, кривые 2—1, 3—1).

У сопряжений «покрытие — АК-4» ход кривых приработки имеет параболический характер, с увеличением Q сокращается время приработки, т. е. чем выше Q , тем меньше τ . При кри-

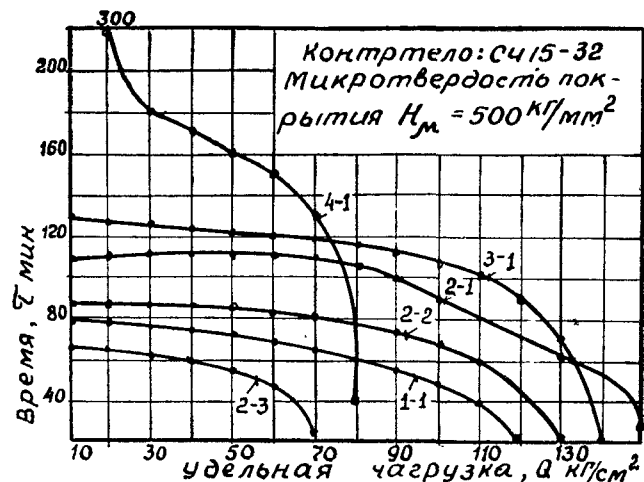


Рис. 29. Изменение времени приработки по ступеням нагрузок (трение по СЧ15-32).

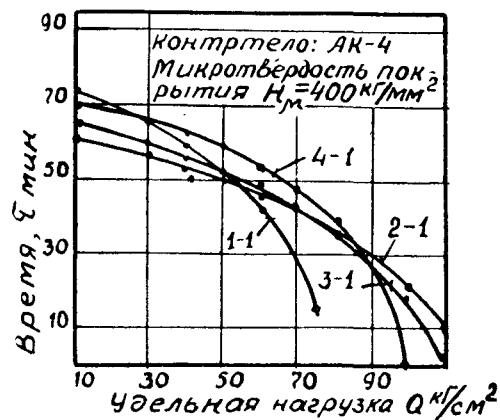


Рис. 30. Изменение времени приработки по ступеням нагрузок (трение по АК-4).

тических значениях Q схватываемость контактирующих поверхностей происходит почти мгновенно.

Параболический характер изменения времени приработки по ступеням нагрузок, по всей вероятности, связан с интенсификацией образования продуктов износа с увеличением Q .

При наблюдении продуктов износа под микроскопом (Х200), в них были видны в большом количестве крупные частицы окислов алюминия. Поверхности контакта имели кольцевые риски — следы абразивного изнашивания покрытий. В некоторых местах на поверхностях контакта покрытий виднелись вдавленные частицы окислов алюминия — «шаржирование». Абразивным характером воздействия продуктов износа объясняется и резкое сокращение времени приработки по ступеням нагрузок.

Исследования показали, что покрытия с оптимальной величиной микротвердости, но полученные при разных режимах и условиях электролиза, обладают неодинаковыми качественными характеристиками.

Наиболее высокую износостойкость имеют покрытия, полученные из среднеконцентрированного электролита 2—1. В условиях производства при восстановлении деталей электролитическим железом этому электролиту (2—1) следует отдавать предпочтение.

Таким образом, долговечность восстановленных деталей (h) в общем виде описывается как функция физических характеристик сопряжений:

$$h = \int_0^t \frac{dh}{d(\Delta x)} \cdot \frac{d(\Delta x)}{dt} dt, \quad (1-8)$$

где:

Δx — допустимая величина износа сопряжений при эксплуатации;

$\frac{d(\Delta x)}{dt}$ — скорость изнашиваемости сопряжений;

$\frac{dt}{dh}$ — вероятностная долговечность сопряжений.

Глава II

ОСНОВЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

1. Физико-химические свойства электролитов остоливания

Для определения рациональных условий электролиза необходимо знать следующие свойства электролитов: плотность (d), кинематическую вязкость (ν), электропроводность (H), удельную электропроводность (λ), подвижность ионов.

Электролиты остоливания, с точки зрения химии, представляют собой раствор хлоридов железа, разной концентрации по соли железа ($C_{\text{ме}}$). В дальнейшем с целью упрощения изложения материала в тексте будем часто использовать химическую терминологию.

Плотность электролитов остоливания (d , г/см³) нужна для контроля и корректировок промышленных ванн, т. к. в этом случае не требуется относительно продолжительных химических анализов, а это, в свою очередь, упрощает обслуживание ванн остоливания. Знание величины плотности электролитов необходимо для расчетов динамических и кинематических коэффициентов вязкости.

Полученные результаты исследований (рис. 31) показывают, что между плотностью и концентрацией ($C_{\text{ме}}$) раствора существует прямопропорциональная зависимость, т. е. с увеличением $C_{\text{ме}}$ плотность раствора возрастает на строго постоянную величину.

Повышение температуры раствора способствует увеличению скорости подвижности ионов, и поэтому плотность раствора (рис. 31-б) соответственно понижается.

Влияние кислотности в электролитах на плотность в диапазоне рабочих значений (1—3 г/л HCl) установить не удалось.

Вязкость электролитов остоливания исследовалась по ГОСТ 1532—42. Кинематическая вязкость рассчитывалась по формуле Фогеля. Для приготовления растворов хлоридов железа использовался бидистиллят. Первоначально готовился раствор с концентрацией 600 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, а за-

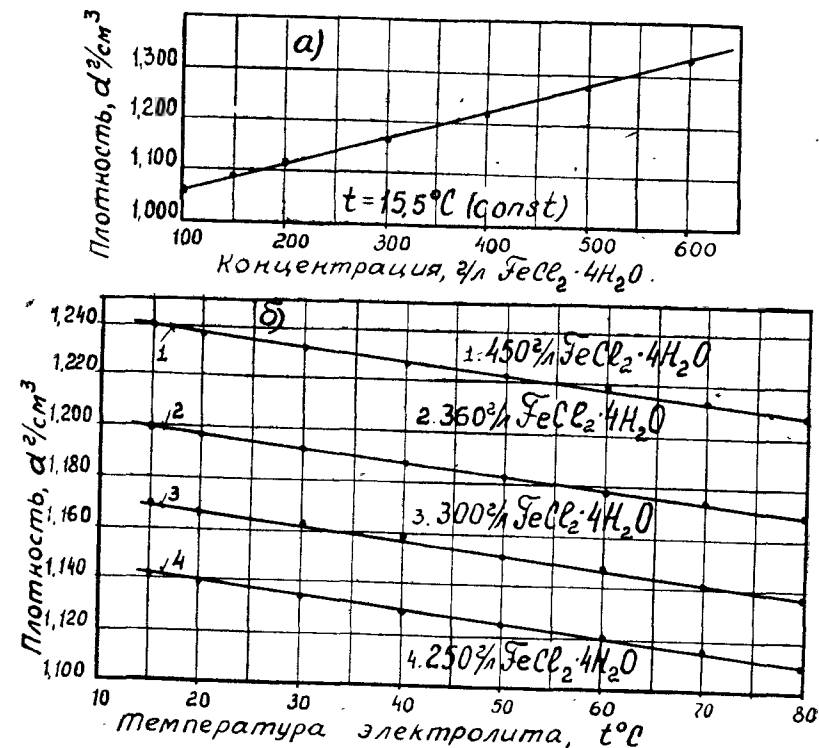


Рис. 31. Изменение плотности в зависимости от концентрации (а) и температуры (б) электролита.

тем проводилось постепенное разбавление этого раствора через 50 г/л до концентрации 100 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Давление раствора было постоянным и равнялось 746 мм рт. ст.

Если к какой-либо части объема жидкости приложить силу сдвига по касательной к поверхности, то жидкость начнет

перемещаться под действием градиента скорости, максимум которой будет в точке приложения силы. Вязкость среды определяется отношением силы сдвига, отнесенной к единице площади в любой точке, к градиенту скорости. Вязкость характеризует силы внутреннего трения раствора, которые противодействуют любому динамическому изменению в движении жидкости. Если трение между слоями жидкости мало, а это бывает при малой вязкости, то, значит, данной силе сдвига соответствует высокий градиент скорости. С увеличением же вязкости сила сцепления между слоями жидкости возрастает и градиент скорости уменьшается.

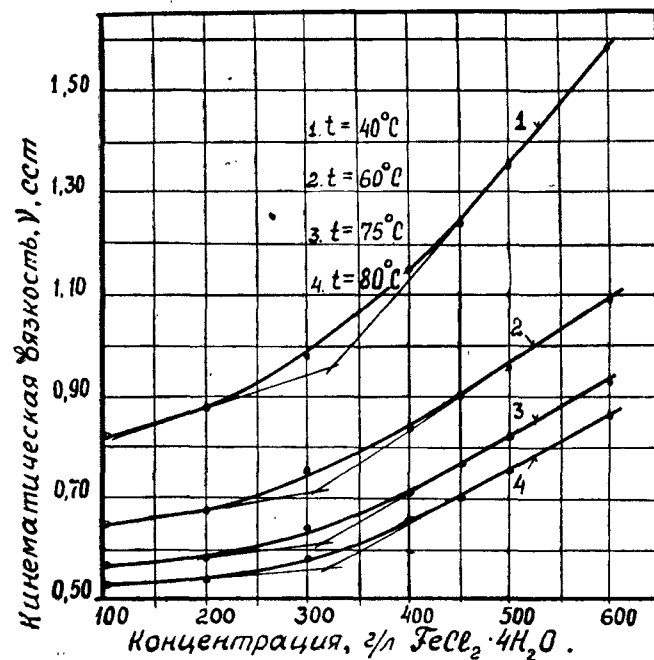


Рис. 32. Изменение кинематической вязкости от концентрации и температуры электролита.

Вязкость жидкости есть проявление динамической неравновесности в макромасштабе, в то время как плотность жидкости является свойством, характеризующим равновесную систему.

Исследования показали (рис. 32), что на вязкость растворов хлоридов железа оказывают влияние концентрация соли железа ($C_{\text{ме}}$) и температура растворов ($t^\circ\text{C}$). Влияние кислотности растворов ($1 \div 5$ г/л HCl) на кинематическую вязкость установлено не было, т. к. полученные расхождения в значениях вязкости в порядке 3—5% были отнесены к погрешностям опыта.

Первоначальное увеличение концентрации соли железа ($C_{\text{ме}}$) со 100 до 300 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ способствует монотонному возрастанию кинематической вязкости. При концентрации 320—350 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ наблюдается перегиб в ходе кривых 1, 2, 3, 4, который указывает на качественные изменения в исследуемом растворе. Дальнейшее повышение концентрации соли железа в растворе способствует более интенсивному, по сравнению с первым случаем, росту значений кинематической вязкости. Так, при изменении в растворе (рис. 31, кривая 4) на 200 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в первом случае (100—300 г/л) кинематическая вязкость увеличилась на 0,1 сСт, а во втором случае (300—500 г/л) — на 0,24 сСт. Предположительно описанное явление можно объяснить тем, что при $C_{\text{ме}} = 320—350$ г/л начинает наблюдаться насыщение раствора ионами железа, и, как следствие этого, резко возрастает кулоновское взаимодействие ионов.

Температура раствора, как известно, влияет на скорость подвижности ионов. С возрастанием температуры раствора скорость подвижности ионов растет. Эти же закономерности наблюдаются и в данных исследованиях (рис. 31, кривые 1, 2, 3, 4).

Полученные температурные кривые кинематической вязкости в основном параллельны между собой, что дает возможность говорить о прямопропорциональной зависимости между η и t . Из рис. 31 следует, что с повышением температуры раствора кинематическая вязкость снижается.

В заключение можно сказать о том, что при содержании в растворе до $C_{\text{ме}} = 300—350$ г/л наблюдается наиболее экономичная зона, т. е. значения кинематической вязкости в данном случае не имеют больших величин и изменяются в узких пределах.

Электропроводность электролитов оставления позволяет определить наиболее экономичные условия электролиза с позиций энергетики процесса.

Электропроводность раствора хлоридов железа изучалась по методике К. П. Мищенко и А. А. Равдаля [11]. Электроды

платинировались в растворе: 3 г четыреххлористой платины + 0,25 г уксуснокислого свинца + 100 г бидистиллята. Электролиз проводился при напряжении 3 в с переменной полюсов через каждые 30 сек. Время платинирования 10 мин. Затем электроды промывались бидистиллятом и подвергались катодному восстановлению в 10%-ном растворе H_2SO_4 с платиновым анодом для удаления адсорбированного хлора. Электроды впаивались в стеклянный каркас и помещались в специальный стеклянный сосуд.

При отсутствии внешнего электрического поля на штангах ванны ионы хлоридов железа находятся в тепловом движении. Результирующее направленное движение ионов равно нулю.

Наложение внешнего электрического поля на тепловое движение ионов способствует возникновению направленного их перемещения к электродам. Гидратная оболочка теряет шаровую форму и становится несимметричной. Положительный ион приобретает приращение скорости (ΔV_+) в направлении электрического поля, а отрицательный ион — (ΔV_-) в противоположном направлении. Возникает результирующий ток, т. е. процесс переноса зарядов.

Количество ионов, а следовательно, и переносчиков зарядов в растворах сильных электролитов находится в прямой зависимости от концентрации соли (C_{me}) [11].

Способность растворов проводить электрический ток, характеризуется удельной электропроводностью (H).

По закону Ома удельная электропроводность равна:

$$H = \frac{S}{R \cdot l} (\text{ом, см.})^{-1}, \quad (2-1)$$

где:

S — площадь поперечного сечения условно принятой трубки тока, см^2 ;

R — сопротивление условной принятой трубки тока, ом ;

l — длина условной трубки тока, см .

С повышением концентрации раствора число ионов на 1 см^2 сечения (S) увеличивается. Это способствует возрастанию электропроводности раствора.

Из рис. 33 следует, что с повышением концентрации раствора до $C_{me} = 300 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4H_2O$ величина H возрастает. При $C_{me} = 300-400 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4H_2O$ проходит через максимум. Дальнейшее повышение C_{me} в растворе приводит к монотонному снижению значения H .

В растворе каждый ион окружен ближайшими, равномерно заряженными ионами. Ионы одноименных зарядов более удалены, чем разноименные, за счет сил электростатического отталкивания.

В системе создаются условия равномерного размещения ионов соли, — нечто приближающееся к подобию расположения их в кристаллах, но на более удаленном расстоянии. Особенности сольватации ионов отражаются и на свойствах растворителя. Взаимодействие ионов между собой и растворителем оказывает влияние на скорость их передвижения в электрическом поле, что приводит к изменению κ раствора с изменением C_{me} . Следовательно, взаимодействие ионов в растворах сильных электролитов зависит от теплового движе-

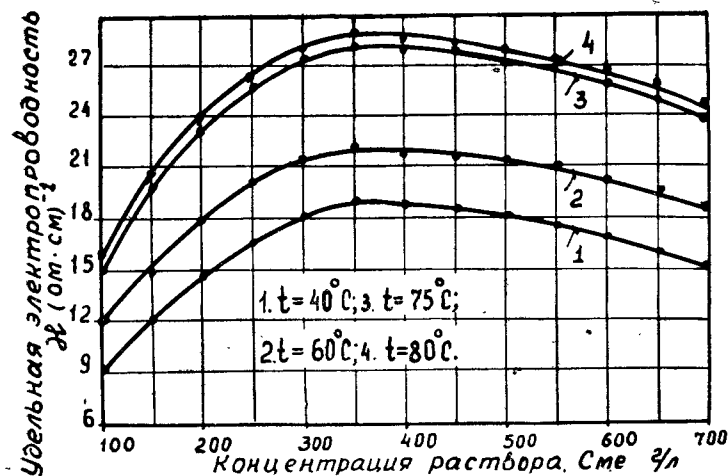


Рис. 33. Зависимость κ от концентрации соли железа и температуры раствора.

ния, кулоновских сил и ионной атмосферы. Ионной атмосферой называют сферу, в которой имеется заряд, противоположный по знаку центральному иону.

При постоянстве температуры раствора изменением теплового движения ионов можно пренебречь. Тогда появление максимумов на кривых (рис. 33) можно объяснить изменением соотношения действия кулоновских сил и плотности ионной атмосферы.

Увеличение C_{me} до 300—400 г/л $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ способствует уменьшению плотности ионных оболочек. В этом случае чис-

ло ионов Me возрастает, а число ионов OH^- уменьшается. Изменение взаимодействия кулоновских сил при этом незначительно.

Дальнейшее повышение $C_{\text{ме}}$ раствора приводит к еще большему уменьшению плотности ионной атмосферы и, как результат этого, к резкому возрастанию сил кулоновского взаимодействия из-за быстро уменьшающихся расстояний между ионами железа. Об этом же свидетельствуют данные по увеличению плотности раствора с ростом $C_{\text{ме}}$.

Подвижность ионов в растворах сильных электролитов характеризуется эквивалентной электропроводностью [9]:

$$\lambda = [\lambda_+ + \lambda_-], \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 / \text{г-экв.} \quad (2-2)$$

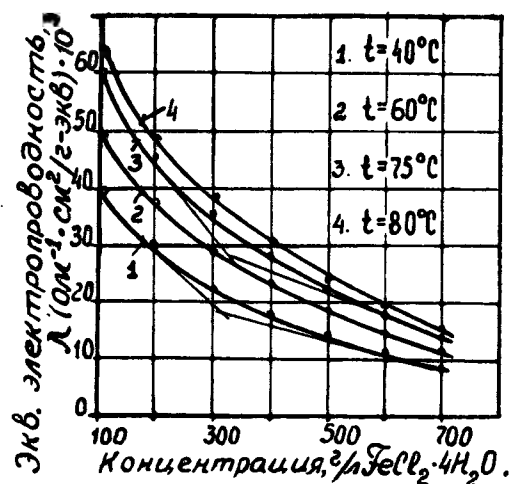


Рис. 34. Зависимость λ от концентрации и температуры растворов.

Эквивалентную электропроводность раствора хлоридов железа можно выразить через κ , т. е.

$$\lambda = \frac{\kappa \cdot 1000}{ci}, \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^2 / \text{г-экв.}, \quad (2-3)$$

где Ci — грамм-эквивалент раствора.

Из (2-3) следует, что с разведением раствора хлоридов железа эквивалентная электропроводность возрастает. Это

положение можно объяснить увеличением подвижности переносчиков зарядов.

С увеличением $C_{\text{ме}}$ подвижность ионов предположительно уменьшается. Это хорошо согласуется с данными эксперимента « $\kappa - C_{\text{ме}}$ » (рис. 34).

С повышением температуры раствора интенсифицируется тепловое движение ионов, оказывающее влияние на плотность ионной атмосферы. Тепловая интенсификация ионов способствует увеличению расстояния между ионами и уменьшению сил кулоновского взаимодействия, что подтверждается изменением кинематической вязкости раствора.

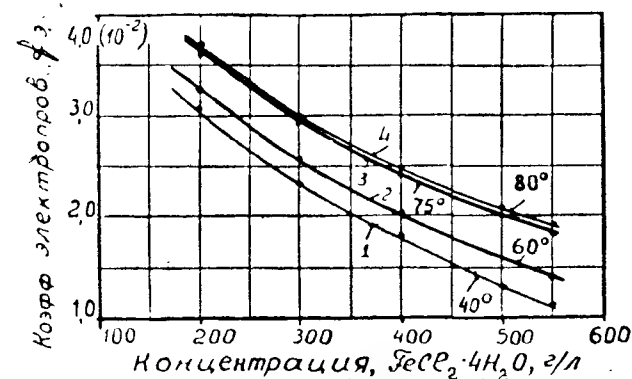


Рис. 35. Влияние температуры и концентрации электролита на коэффициент электропроводности.

Подвижность ионов в растворах сильных электролитов характеризуется коэффициентом электропроводности (f_3), который определяется

$$f_3 = \frac{\lambda}{\lambda_\infty}, \quad (2-4)$$

где

λ — эквивалентная электропроводность;

λ_∞ — эквивалентная электропроводность при бесконечном разбавлении.

Величина λ_∞ определялась методом экстраполирования [11].

Расчеты коэффициентов электропроводности (рис. 35) показали, что с уменьшением концентрации раствора подвиж-

ность ионов возрастает. Повышение температуры растворов хлоридов железа увеличивает подвижность ионов более интенсивнее с ростом c . Таким образом, коэффициенты электропроводности подтвердили ранее выдвинутые предположения о влиянии скорости подвижности ионов на плотность, вязкость, электропроводность раствора хлоридов железа.

Итак, из полученных расчетных и экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

а) раствор с $C_{\text{ме}} = 320\text{—}350$ г/л имеет зону минимальной вязкости и при $C_{\text{ме}} = 300\text{—}400$ г/л зону максимальной электропроводности;

б) повышение температуры раствора способствует уменьшению вязкости, плотности и возрастанию электропроводности этого раствора при неизменных мини-максимальных зонах;

в) с позиций энергетики процесса электролиза экономичным является электролит с $C_{\text{ме}} = 300\text{—}360$ г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

2. Условия псевдостационарности электролитов осталивания

Процесс осаждения электролитического железа осуществляется с растворимыми анодами. Этим достигается восполнение убыли ионов железа в электролитах осталивания. От того, какое количество ионов поступает в электролит с анодов и какое количество ионов убывает из электролита на катод, зависит изменение концентрации данного электролита по соли железа. Постоянство концентрации электролита есть одно из основных условий получения покрытий с воспроизводимыми физико-механическими свойствами.

Электролиты осталивания представляется возможным описать системой взаимодействующих групп ионов, обособленных от окружающей среды. Данная система будет гомогенной, т. е. в ней отсутствуют поверхности раздела.

Процесс электролиза при восстановлении изношенных поверхностей деталей чаще всего протекает при постоянстве температуры ($t = 75^\circ\text{C}$) и давления ($P \approx 1$ атм). Переменными параметрами являются: кислотность (HCl), объемная (D_0) и катодная (D_k) плотности токов. Кислотность систематически при электролизе убывает (вырабатывается). Убыль ее восполняется периодическими внесениями новых порций. Объемная и катодная плотности токов изменяются при смене

номенклатуры восстанавливаемых деталей и при изменении количества деталей в одном завесе.

Исследования, проведенные автором, показали, что при постоянстве параметров электролиза электролиты с концентрацией 700 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и 100 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ с течением времени принимают одинаковую концентрацию по соли железа (рис. 36). Изменение параметров электролиза приводит к изменению величины установившейся концентрации соли железа.

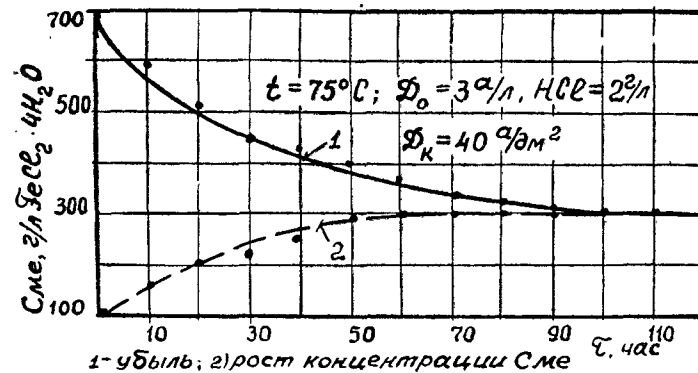


Рис. 36. Влияние параметров электролиза на стационарность электролита по соли железа: 1) убыль, 2) рост концентрации.

Закон Фарадея постулирует, что при прохождении через электролит 96500 к/г-экв электричества, выделяется количество вещества, отвечающее грамм-эквиваленту, или $6,02 \cdot 10^{23}$ электронов. Пусть при прохождении через электролит осталивания тока в количестве одного фарадея ($F = 96500$ к/г-экв.) на катоде произойдет соосаждение ионов железа и водорода; а на аноде химическое и электрохимическое растворение поверхности металла анода. Таким образом, будем иметь:

а) насыщение концентрации электролита по $C_{\text{ме}}$:

$$N_a > N_k; \quad (2-5)$$

б) убыль концентрации электролита по $C_{\text{ме}}$

$$N_a < N_k; \quad (2-6)$$

в) постоянство концентрации электролита по $C_{\text{ме}}$

$$N_a = N_k. \quad (2-7)$$

Взаимодействие ионов железа, перешедших с анода в электролит (N_a), концентрации электролита в данный момент (C_9) и убыль ионов железа из электролита (осаждение на катоде N_k) опишем реакцией в общем виде:



где K_1 и K_2 — константы, характеризующие начальную и конечную стадию протекающих реакций.

В условиях производства при восстановлении деталей для получения воспроизводимых физико-механических свойств покрытий необходимо иметь постоянство концентрации электролита по соли железа или знать закономерности ее изменения.

Начальная и конечная стадии процесса электролиза могут быть известны по балансу тока, пошедшего на электролиз. Зная катодный и анодный выходы железа по току, можно косвенно судить о наличии того или иного соотношения ионного баланса. Выход железа по току показывает, какая часть пропущенного через электролит электричества приходится на долю каждой реакции. С ростом D_k и C_{me} катодный выход по току железа увеличивается, а соответственно водорода — уменьшается. Анодный выход по току железа имеет обратную зависимость, т. е. увеличивается с уменьшением D_k и C_{me} (табл. 10).

При некоторых режимах и условиях электролиза анодный выход железа по току (табл. 10) имеет величину более 100%. Анодный выход по току ($\Sigma \alpha_a$) суммируется из электрохимического ($\alpha_a^{эл}$) и химического ($\alpha_a^{хим}$) растворения металла анодов. Анализ полученных данных показывает, что суммарная величина более 100% достигается за счет составляющей химического растворения анодов. $\alpha_a^{хим}$ возрастает с уменьшением C_{me} и D_k .

Уменьшение концентрации раствора по соли железа увеличивает подвижность ионов, окисляющее действие Cl^- , OH^- возрастает.

При наращивании слоя железа определенной толщины время электролиза (T_0) в основном определяется величиной катодной плотности тока (D_k). С уменьшением D_k скорость разряда ионов железа падает, а T_0 — возрастает. С увеличением T_0 вклад составляющей $\alpha_a^{хим}$ в результирующую величину $\Sigma \alpha_a$ становится весомее, что и приводит к значению $\Sigma \alpha_a > 100\%$.

С целью упрощения расчетов введем понятие коэффициента стационарности ($C_{ст}$):

Таблица 10

Влияние параметров электролиза на анодные и катодные выходы по току

Параметры электролиза				Выход по току, %					
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$, г/л	t °C	HCl, г/л	D_k , а/дм ²	α_{Fe_k}	$\alpha_{H_2_k}$	$\Sigma \alpha_k$	$\alpha_{эл_a}$	$\alpha_{хим_a}$	$\Sigma \alpha_a$
200	80	1,5	5	71,5	9,2	80,7	92,9	35,4	128,3
200	80	1,5	10	74,8	9,1	83,9	94,0	22,4	116,4
200	80	1,5	15	79,1	8,3	87,4	95,6	14,4	110,0
200	80	1,5	20	81,3	8,1	89,4	96,0	12,0	108,0
200	80	1,5	40	85,2	8,0	93,2	97,0	8,0	105,6
200	80	1,5	60	86,9	8,0	94,9	97,2	7,5	104,7
200	80	1,5	100	88,3	8,0	96,3	98,0	7,2	101,2
300	75	1,5	5	76,6	8,2	84,8	78,0	24,4	102,4
300	75	1,5	10	83,7	8,0	91,7	85,4	16,2	101,6
300	75	1,5	15	88,8	6,4	95,2	88,0	13,5	101,5
300	75	1,5	20	89,9	6,3	96,2	90,0	11,4	101,4
300	75	1,5	40	96,4	3,4	99,8	94,4	6,9	101,3
300	75	1,5	60	96,5	3,4	99,9	94,4	6,7	101,1
300	75	1,5	100	96,6	3,4	100,0	97,7	3,3	101,0
450	80	1,5	5	83,9	7,8	91,7	79,4	22,3	101,7
450	80	1,5	10	89,0	7,1	96,1	86,5	12,7	99,2
450	80	1,5	15	92,8	4,3	97,1	88,2	9,8	98,0
450	80	1,5	20	94,0	3,6	97,6	88,7	7,3	96,0
450	80	1,5	40	96,3	3,0	99,3	89,7	5,0	94,7
450	80	1,5	60	96,7	2,4	99,1	90,0	4,1	94,1
450	80	1,5	100	97,1	2,4	99,5	90,4	3,2	93,6
600	80	1,5	5	89,6	5,6	96,2	87,1	12,9	100,0
600	80	1,5	10	92,9	4,8	97,7	88,3	7,8	96,1
600	80	1,5	15	96,5	3,2	99,7	88,3	7,7	96,0
600	80	1,5	20	96,6	3,0	99,6	88,1	7,2	95,3
600	80	1,5	40	97,8	2,1	99,9	90,2	4,0	94,2
600	80	1,5	60	98,0	1,8	99,8	90,4	3,2	93,6
600	80	1,5	100	98,9	1,0	99,9	90,6	0,4	91,0

$$C_{ст} = \frac{\alpha_{Fe_k}^{Fe}}{\Sigma \alpha_a}, \quad (2-9)$$

где:

$\alpha_{Fe_k}^{Fe}$ — катодный выход по току железа;

$\Sigma \alpha_a$ — суммирующий анодный выход по току железа.

По данным (табл. 10) были подсчитаны коэффициенты стационарности, которые приведены на рис. 37. Коэффициенты стационарности ($C_{ст}$) изменяются по величине с изменением параметров электролиза. Так, с ростом D_k коэффициенты стационарности увеличиваются за счет возрастания ка-

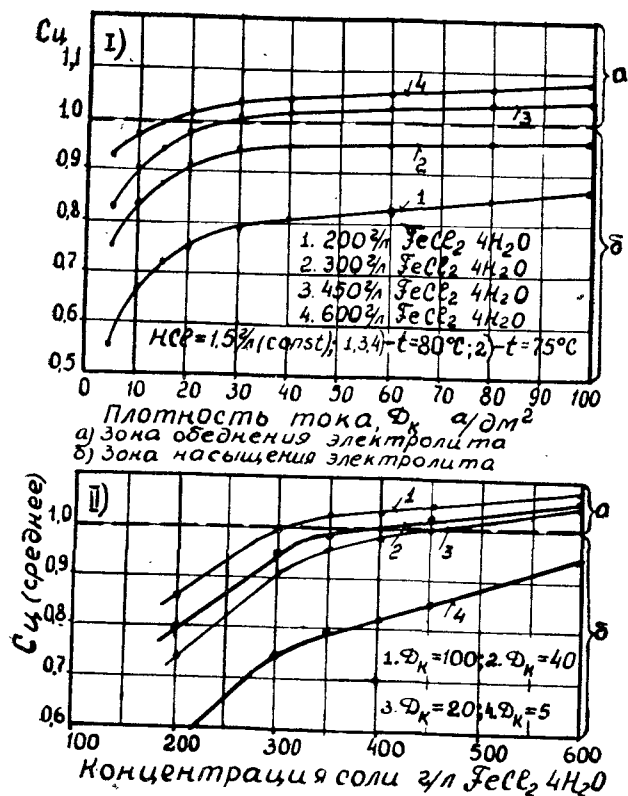


Рис. 37. Влияние параметров электролиза на коэффициент стационарности.

тодного выхода по току железа. У электролитов $C_{\text{ме}} = 200$ и $300 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ с увеличением D_k коэффициент стационарности стремится к единице. Концентрация этих электролитов обогащается ионами железа (выполняется неравенство 2—5).

Электролиты $C_{\text{ме}} = 450—600 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ при $D_k = 5 \div 10 \text{ а/дм}^2$ имеют значения $C_{\text{ц}} < 1$, но с дальнейшим ростом D_k значение $C_{\text{ц}} > 1$ (выполняется неравенство (2—6)), т. е. концентрации электролитов по соли железа убывают за счет преобладания катодного выхода по току металла над анодным.

В первом случае скорость разряда ионов железа на катоде

замедлена из-за большой величины перенапряжения (перенапряжение ионов железа и водорода близки).

С увеличением концентрации соли железа ($C_{\text{ме}}$) в растворе перенапряжение осаждения металла уменьшается, а водорода — увеличивается (табл. 11).

Таблица 11
Влияние параметров электролиза на потенциал катода [10]

$C_{\text{ме}}, \text{г/л}$ ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	$D_k,$ а дм^2	pH	$t, ^\circ\text{C}$	$-\varphi_k, \text{mv}$
200	20	0,65	75	900
300	20	0,65	75	850
450	20	0,65	75	815
600	20	0,65	75	800

Во втором случае, скорости электрохимических реакций на аноде, наоборот, уменьшаются с ростом концентрации раствора по $C_{\text{ме}}$.

По изложенной причине в первом случае идет преобладание скоростей анодных реакций над катодными, а во втором случае интенсифицируются скорости катодных реакций над анодными.

Во втором случае на аноде скорость электрохимической реакции замедлена, а скорость диффузии (поставка ионов в электролит) вынужденно снижена. Медленный расход реагирующих ионов не создает достаточно большой разности концентраций, необходимой для развития диффузии.

Из изложенного выше следует, что на изменение концентрации электролита влияет большое число переменных разной физической природы. Ввиду этого не представляется возможным полностью стабилизировать условия электролиза, поэтому и концентрация электролита по соли железа не может быть постоянной. Процесс увеличения или уменьшения концентрации электролита является обратимым. Отмеченное равновесие системы является кажущимся. С целью полного отражения характера неустойчивого равновесия в системе она названа псевдостационарной. Псевдостационарное состояние имеет ряд признаков:

- 1) при отсутствии внешних воздействий состояние системы остается в отношении концентрации соли железа неизменным;
- 2) система следует за изменением внешних воздействий;

3) снятие внешних воздействий не возвращает систему в исходное состояние;

4) степень смещения системы от состояния равновесия определяется величиной воздействующих факторов: направление смещения — направления действия факторов ($C_{\text{ц}} < 1$ — возрастание концентраций, $C_{\text{ц}} > 1$ убыль концентрации);

5) псевдостационарность данной системы неизменна, независимо от того, с какой стороны это состояние получено.

Теоретическое решение псевдостационарной системы привело к сложным математическим расчетам. Из-за отсутствия некоторых коэффициентов в материальном балансе пользование выведенными формулами в условиях производства было затруднено.

В условиях эксперимента был найден более удобный путь расчета псевдостационарного состава электролита, а именно, найдена экспоненциальная зависимость, описываемая формулой:

$$C_{\text{ме}} = \exp(q_{\text{к}} + q_{\text{а}} C_{\text{м}}) \cdot 2,3, \text{ г/л}; \quad (2-10)$$

где:

$q_{\text{к}}$ — константа, характеризующая катодный процесс осаждения ионов железа;

$q_{\text{а}}$ — константа, характеризующая анодный процесс растворения металла анодов.

Значения констант $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{а}}$ определены экспериментальным путем (табл. 12).

Таблица 12

Влияние параметров электролиза на $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{а}}$

$D_{\text{к}}$ а/дм ²	HCl, г/л	t °C	Константы	
			$q_{\text{к}}$	$q_{\text{а}}$
5	1,5	75	1,3590	1,5010
10	1,5	75	1,2980	1,4450
20	1,5	75	1,2002	1,4152
30	1,5	75	1,4558	1,0730
40	1,5	75	1,6346	0,8525
50	1,5	75	1,7880	0,6900
60	1,5	75	1,7915	0,6790
70	1,5	75	1,8102	0,6432
80	1,5	75	1,8904	0,5440

По формуле (2—10) были рассчитаны псевдостационарные концентрации электролита при температуре $t=75^\circ\text{C}$ и кислотности $\text{HCl}=1,5 \text{ г/л}$ (табл. 13).

Таблица 13

Расчетная псевдостационарная концентрация электролита по $C_{\text{ме}}$

Псевдостационарная концентрация электролита	Плотность тока, $D_{\text{к}}$, а/дм ²								
	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$C_{\text{ме}}, \text{г/л}$	724	553	412	338	310	300	298	284	275

Из анализа табл. 13 следует, что уменьшение катодной плотности тока способствует росту железа при псевдостационарном состоянии раствора. Увеличение катодной плотности тока соответственно понижает количество железа при псевдостационарном состоянии раствора. В реальных условиях производства, как показали проведенные нами обследования ряда авторемонтных заводов, процесс электролиза при восстановлении деталей в большинстве случаев проводится при плотностях тока $D_{\text{к}}=30-60 \text{ а/дм}^2$. Псевдостационарная концентрация раствора при этих условиях электролиза колеблется в пределах, согласно расчетным данным, 338—298 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Расчетная величина псевдостационарной концентрации раствора на 3—5% отличается от псевдостационарной концентрации промышленной ванны по следующим причинам:

а) часть электролита уносится подвесками, изоляцией и поверхностями восстанавливаемых деталей;

б) часть электролита уносится анодными мешками, шламом и поверхностями анодов;

в) часть электролита теряется при фильтрации и выносятся вытяжной вентиляцией.

Коэффициент выноса и потерь электролита отражает технологическую культуру производства при восстановлении деталей.

Разумеется, что там, где выше технологическая культура, потерь электролита меньше.

На основе проведенных исследований для условий производства рекомендуется готовить электролит с концентрацией соли железа 300 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Этот электролит через 2—3 смены, с учетом специфики данного производства, быстро приобретает псевдостационарное состояние по концентрации соли железа. Кроме того, раствор с такой концентрацией соли железа имеет зоны наивысшей электропроводности и наименьшей вязкости, покрытия, полученные из него, отличаются наибольшей работоспособностью.

3. Выбор пределов кислотности

Пределы кислотности у электролитов осталывания были определены и обоснованы И. М. Мелковой [12].

В растворе хлоридов железа при электролизе реакция взаимодействия солей кислот и слабых оснований идет с образованием основного хлорида FeOHCl , или FeOHCl_2 . Ионы железа (Fe^{2+}) связывают ионы (OH^-), а в растворе появляются избыточные ионы водорода (H^+), и поэтому раствор имеет кислую реакцию.

В результате гидролиза соли железа и разряда H^+ при электролизе в прикатодном слое происходит изменение кислотности.

Кислотность растворов характеризуется концентрацией H^+ или величиной $\text{pH} = -\lg \text{CH}$.

Исследования [12] защелачивания прикатодного слоя при изменении $C_{\text{ме}}$, HCl раствора и D_k показали, что с увеличением D_k от 3—8 a/dm^2 происходит наиболее интенсивное защелачивание прикатодного слоя. С дальнейшим повышением D_k , pH прикатодного слоя возрастает незначительно. С увеличением $C_{\text{ме}}$ в растворе влияние повышения D_k на величину pH уменьшается, что связано с облегчением осаждения железа из затрудненным разряда ионов водорода. Максимальное защелачивание прикатодного слоя идет в диапазоне кислотности 0,3—1,1 g/l HCl , где буферная емкость раствора хлоридов железа наименьшая. С увеличением HCl в растворе защелачивание прикатодного слоя уменьшается при всех D_k .

Защелачивание, происходящее в прикатодной зоне, приводит к накоплению гидроокиси, которая, включаясь в покрытие, разрушает целостность структуры электролитического железа (она становится слоистой) и ухудшает долговечность восстановленных деталей.

На основании изложенных результатов был сделан вывод о том, что содержание свободной кислоты в растворе хлоридов железа ниже $\text{HCl} = 1,1 \text{ g/l}$ нежелательно, а ниже $\text{HCl} = 0,5 \text{ g/l}$ недопустимо.

Перевод величины кислотности g/l в значение pH , и наоборот, в зависимости от $C_{\text{ме}}$ в растворе, приводится на рис. 38.

Величину кислотности $\text{HCl} = 1,1 \text{ g/l}$ принято считать нижним допустимым пределом кислотности.

Верхний предел кислотности был установлен в зависимости от технико-экономических условий электролиза. Основным критерием служил катодный выход железа по току.

На основании исследований [8, 12 и др.] было установлено, что с повышением кислотности раствора катодный выход железа по току резко падает, а анодный — растет. С увеличением $C_{\text{ме}}$ в растворе α_k^{Fe} повышается, а $\Sigma \alpha_a$ — уменьшается.

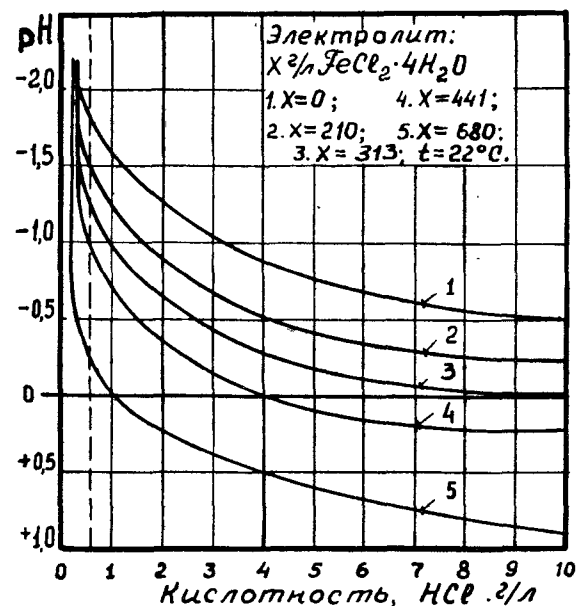


Рис. 38. Изменение pH хлоридов железа от HCl (g/l).

Величина кислотности $\text{HCl} > 3 \text{ g/l}$ в растворе хлоридов железа незначительно оказывает влияние на защелачивание прикатодного слоя, но резко снижает катодный выход железа по току. На основе изложенного, было признано неэкономичным применение в условиях производства использование кислотности $\text{HCl} > 3 \text{ g/l}$.

Величина кислотности $\text{HCl} = 3 \text{ g/l}$ раствора принята за верхний допустимый предел кислотности.

4. Выбор рациональной начальной плотности тока

Качественное сцепление электролитического железа (покрытия) с основным металлом детали (основой) во многом

зависит от начальных режимов электролиза, в частности от начальной плотности тока ($D_{\text{к}}^{\text{нач}}$).

Для определения начальных условий электролиза были проведены потенциостатические исследования [12] изменения начального тока во времени в различных условиях электролиза.

При электролизе возможно как выделение железа и водорода, так и одного водорода при более положительном потенциале. Если на катоде поддерживать постоянный потенциал (φ), то ток, идущий на определенную реакцию, будет изменяться с изменением сопротивления цепи. Отсюда следует, что если меняется один параметр, то можно установить его зависимость от $D_{\text{к}}$.

После включения тока на катоде происходят следующие явления: зарядка двойного слоя, выделение водорода, изменение состояния поверхности восстанавливаемой детали под влиянием H_2 , повышение рН прикатодного слоя. Изменения качественного состояния поверхности и рН прикатодного слоя происходят в период времени τ_1 , которое может через период τ привести к постепенному созданию условий для разряда ионов железа. Описанное явление произойдет только при достаточной величине потенциала.

Возможно несколько случаев соотношений величин [12] τ и τ_1 :

- 1) $0 < \tau \leq \tau_1$, когда осаждение ионов железа начинается до окончания изменения в двойном слое или одновременно с его окончанием;
- 2) $\tau = 0$, когда осаждение ионов железа начинается сразу после включения тока;
- 3) $\tau = \infty$, когда осаждения ионов железа не происходит.

В первом случае происходит реакция выделения водорода. С течением времени поверхность активизируется и постепенно переходит к процессу совместного разряда ионов водорода и железа.

Во втором и третьем случаях железо или не осаждается вообще или осаждается на пассивную, не успевшую активироваться, поверхность.

Температура раствора хлоридов железа оказывает большое влияние на $D_{\text{к}}^{\text{нач}}$. С увеличением температуры уменьшается адсорбционная способность железа, что повышает активацию поверхности катода. Подводимая энергия при этом в большей степени расходуется на разряд ионов железа, чем при понижении температуры раствора хлоридов железа.

Для получения прочного сцепления покрытия с поверхностью восстанавливаемой детали при снижении температур растворов следует уменьшать $D_{\text{к}}^{\text{нач}}$.

Понижение кислотности раствора хлоридов железа менее $HCl < 1,1$ г/л отрицательно сказывается на прочности сцепления покрытия с основой, т. к. в этом случае появляются концентрационные ограничения по водороду из-за высокого рН и

Таблица 13

Влияние t раствора на $D_{\text{к}}^{\text{нач}}$ ($HCl=1,1$ г/л)

Концентрация раствора, $C_{\text{ме}}$, г/л	Температура, °C				
	40	50	60	75	83
	начальная рациональная плотность тока, a/dm^2				
200	3,35	3,67	4,10	4,91	5,97
300	2,68	2,93	3,16	3,71	4,38
450	—	2,15	2,64	3,27	3,76
680	1,56	1,69	1,83	2,31	2,72

потенциала катода. На поверхности катода образуются гелеобразные пленки гидроокиси железа вследствие интенсивного зашлакачивания прикатодного слоя с включением тока.

На основе исследований [12] были определены начальные плотности тока, необходимые для получения прочного сцепления покрытия с основой и названные рациональными начальными плотностями тока (табл. 13).

Для определения рациональной плотности тока при разной кислотности раствора следует пользоваться графиком (рис. 39).

С увеличением кислотности (рис. 39) при концентрациях раствора $C = 200, 300, 450$ г/л рациональная начальная плотность тока повышается. При большей концентрации $C = 680$ г/л

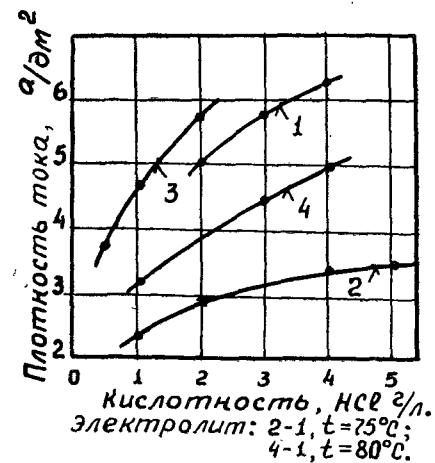


Рис. 39. Влияние HCl на $D_{\text{к}}^{\text{нач}}$:
1) $C_{\text{ме}}=300$ г/л; 2) $C_{\text{ме}}=680$ г/л;
3) $C_{\text{ме}}=200$ г/л; 4) $C_{\text{ме}}=450$ г/л;
1, 3, 4 — $t=75^\circ C$; 2 — $t=80^\circ C$.

повышение рациональной начальной плотности тока наблюдается при увеличении HCl до 3 г/л, а дальнейшее увеличение HCl существенно не сказывается на изменении $D_k^{нач}$.

Механические испытания прочности сцепления покрытия с основой показали существенное влияние изменения $D_k^{нач}$ на силу сцепления. Это позволяет сделать вывод, что начальному периоду электролиза в условиях производства необходимо уделять постоянное внимание и значения $D_k^{нач}$, выдерживать с достаточной точностью, т. к. прочность сцепления покрытия с основой изношенной поверхности детали обеспечивается рациональной начальной плотностью тока.

5. Взаимосвязь между параметрами электролиза и величиной микротвердости покрытий

Микротвердость электролитического железа является основным критерием его качества в условиях производства.

Значение влияния условий ($C_{ме}$, HCl) и режимов электролиза (D_k , τ) на микротвердость покрытий (H_m) с достаточной глубиной и полнотой установлено в исследованиях М. П. Мелкова [6].

Для технологической подготовки производства по восстановлению изношенных поверхностей деталей, при составлении и разработке технологических процессов на эти детали возникает необходимость в расчетах H_m , в зависимости от условий и режимов электролиза. Эти же потребности часто возникают в условиях производства (непосредственно на рабочих местах) при отклонении условий электролиза в ту или иную сторону, в процессе получения H_m строго определенных значений.

Путь экспериментальных определений H_m для требований производства является трудоемким, малоэффективным и требует наличия работников высокой квалификации. Наличие же установленных математических зависимостей, позволяющих дать в простой и доступной форме расчет параметров электролиза по заданной H_m , значительно эффективнее, точнее и экономичнее, чем определение опытных взаимосвязей тех же величин.

Микротвердость электролитического железа (H_m) находится в сложной функциональной зависимости между условиями и режимами электролиза.

$$H_m = f[D_k, t, (HCl), (C_{ме})]. \quad (2-11)$$

Для решения уравнения (2-11) ряд функциональных величин, входящих в формулу, следует оставить постоянными на каком-то уровне, а часть их варьировать на разных уровнях. Установив одну математическую закономерность, затем перейти к рассмотрению второй и т. д.

В данном случае анализ функциональных зависимостей на аргумент будем рассматривать в порядке значимости их влияния на микротвердость покрытий в условиях восстановления изношенных поверхностей деталей автомобилей.

Влияние катодной плотности тока на (H_m) электролитического железа. Катодная плотность тока (D_k) является основным регулируемым параметром в условиях производства и к тому же D_k оказывает существенное влияние на H_m покрытий.

Из анализа опытных данных, полученных многими исследователями следует, что между H_m и D_k имеется зависимость, описываемая степенным рядом:

$$a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \dots + a_n(x - x_0)^n \equiv \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - x_0)^n, \quad (2-12)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ — коэффициенты степенного ряда.

При $X_0 = 0$, будем иметь

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \equiv \sum_{n=0}^{\infty} a_nx^n. \quad (2-13)$$

Величина микротвердости покрытий (H_m) изменяется с изменением D_k , т. е. $\frac{dH_m}{dD_k} = h(D_k)$. Поэтому $\frac{dH_m}{dD_k}$ есть величина микротвердости, изменившаяся за счет увеличения D_k на единицу.

Приравняв:

$$a_n = h(D_k), \quad x = D_k, \quad n = b, \quad \text{при } a_n > 0,$$

после подстановки в (2-13) получаем частный случай — степенную функцию:

$$H_m = hD_k^b, \quad \text{кг/мм}^2, \quad (2-14)$$

где

h — начальная микротвердость покрытия, полученная при $D_k = 1 \text{ а/дм}^2$. (В выводе сделано допущение: при $D_k = 1 \text{ а/дм}^2$ во всех случаях имеет место осаждение железа);

b — константа, зависящая от концентрации соли в растворе.

Значения h и b для расчетов выбираются из табл. 14.

Таблица 14

Влияние $C_{\text{ме}}$ на h и b ($\text{HCl} = 1,5 \text{ г/л}$; $t = 75^\circ\text{C}$)

$C_{\text{ме}}, \text{г/л}$ ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	h кг/мм^2	b
200	275,7	0,1828
300	221,8	0,2284
450	169,8	0,2749
680	114,8	0,3369

Результаты расчета H_m покрытий по формуле (2-14) хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 15) и позволяют с высокой точностью рассчитать функциональную зависимость $H_m = f(D_k, C_{\text{ме}})$ при HCl и $t = \text{const}$.

Таблица 15

Влияние D_k и $C_{\text{ме}}$ на H_m покрытий ($\text{HCl} = 1,5 \text{ г/л}$, $t = 75^\circ\text{C}$)

D_k а/дм^2	$C_{\text{ме}} = 200 \text{ г/л}$		$C_{\text{ме}} = 300 \text{ г/л}$		$C_{\text{ме}} = 450 \text{ г/л}$		$C_{\text{ме}} = 680 \text{ г/л}$	
	H_m , кг/мм^2 расч.	H_m , кг/мм^2 эксп.	H_m , кг/мм^2 расч.	H_m , кг/мм^2 эксп.	H_m , кг/мм^2 расч.	H_m , кг/мм^2 эксп.	H_m , кг/мм^2 расч.	H_m , кг/мм^2 эксп.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	369	360	321	320	264	275	198	200
10	410	415	375	375	320	320	249	250
20	477	477	440	440	386	386	315	315
30	513	513	482	490	433	433	361	361
40	541	541	515	520	470	468	397	400
50	564	564	542	542	498	498	429	429
60	583	583	563	563	523	524	456	457
70	600	600	585	580	546	550	480	480
80	614	610	603	600	567	575	502	500
90	628	620	619	620	585	580	523	525

Ввиду того, что в последнее время в условиях производства стали использовать электролиты с псевдостационарными концентрациями по соли железа, для них были проведены расчеты и определены величины H_m покрытий (табл. 16).

Таблица 16

Влияние D_k и $C_{\text{ме}}$ на H_m покрытий ($\text{HCl} = 1,5 \text{ г/л}$, $t = 75^\circ\text{C}$)

$C_{\text{ме}}, \text{г/л}$	$D_k, \text{а/дм}^2$					
	10	20	30	40	50	60
$H_m, \text{кг/мм}^2$						
310	362	435	475	507	534	558
320	357	430	472	503	532	555
340	347	424	463	498	522	552
360	337	417,8	458	491	520	548
380	328	409,3	452	485	515	544

Кислотность раствора на H_m электролитического железа, в установленных пределах ($\text{HCl} = 1,1 \div 3 \text{ г/л}$), существенного значения на величину H_m не оказывает. По этой причине вывод математической зависимости не производился, и во всех расчетах кислотность раствора хлоридов железа чаще всего принималась $\text{HCl} = 1,5 \text{ г/л}$.

Влияние $C_{\text{ме}}$ на H_m покрытий. Изменение концентрации соли железа в растворе изменяет условия осаждения железа за счет изменения поляризации катода [10], а это сказывается, в свою очередь, и на величине H_m покрытий.

Допустим, что при $D_k = \text{const}$ величина микротвердости покрытий равна H_0 . С увеличением $C_{\text{ме}}$ микротвердость покрытий изменится и станет H , т. е. за $dC_{\text{ме}}$ изменение будет λH :

$$\frac{dH}{dC_{\text{ме}}} = \lambda H, \quad (2-15)$$

где: λ — константа изменения H_m от $C_{\text{ме}}$.

Из (2-15) имеем:

$$dH = \lambda H dC_{\text{ме}}. \quad (2-16)$$

Вычисляем с помощью уравнения (2-16) величину H .

Разделим обе части уравнения (2-16) на H и проинтегрируем по $C_{\text{ме}}$.

Получим:

$$\int \frac{dH}{H} = \lambda \int dC_{\text{ме}}, \quad (2-17)$$

откуда:

$$\ln H = \lambda C_{\text{ме}} + C. \quad (2-18)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия, что в начальный момент микротвердость покрытий равна H_0 и изменений в концентрации электролита не было.

В этом случае $H = H_0$, $C = \ln H_0$. Произведя подстановку значения C в уравнение (2-18), получим:

$$H = H_0 e^{\lambda C_{\text{ме}}}. \quad (2-19)$$

Величины H_0 и λ находятся расчетным путем по данным эксперимента. При $D_k = \text{const}$ величины H_0 и λ постоянны, но с изменением D_k они будут также изменяться. Для проведения необходимых расчетов по влиянию $C_{\text{ме}}$ на H_m следует значения H_0 и λ выбирать по табл. 17.

Таблица 17

Значения H_0 и λ от величины D_k

Плотность тока D_k , а/дм ²	H_0 , кг/мм ²	λ
10	562,3	— 0,00142
20	567,6	— 0,00086
30	595,4	— 0,00072
40	619,4	— 0,00064
50	631,0	— 0,00053
60	623,0	— 0,00034
70	606,0	— 0,00010

Знак «—» у λ говорит о том, что увеличение концентрации соли железа в растворе снижает значения H_m . Это явление хорошо согласуется с результатами эксперимента (табл. 18).

Таблица 18

Влияние $C_{\text{ме}}$ на H_m покрытий. ($\text{HCl} = 1,5 \text{ л/г}$; $t = 75^\circ \text{C}$)

Плотность тока, D_k , а/дм ²	Концентрация $C_{\text{ме}}$, г/л, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$							
	200		300		450		680	
	расчет.	эксп.	расчет.	эксп.	расчет.	эксп.	расчет.	эксп.
микротвердость H_m , кг/мм ²								
10	417	415	368	375	298	320	215	250
20	478	477	438	440	385	386	315	315
30	513	513	479	490	429	433	364	361
40	544	541	511	520	464	468	398	400
50	566	564	538	542	496	498	437	429
60	581	583	559	563	530	524	467	457

Влияние $C_{\text{ме}}$ на D_k и на величину H_m покрытий при одновременных непропорциональных их изменениях. Такие ситуации часто возникают в условиях производства при восстановлении деталей, когда ванны осталивания не имеют автоматических устройств по поддержанию уровня электролита и по стабилизации тока.

Совместное графо-аналитическое решение уравнений (2-19), (2-14) позволило найти следующую расчетную формулу:

а) в общем виде

$$H_m = [\exp(H_0 - \lambda C_{\text{ме}}) \cdot 2,3] \cdot D_k^{\frac{C_{\text{ме}}}{h + b C_{\text{ме}}}}, \text{ кг/мм}^2, \quad (2-20)$$

б) для практических расчетов:

$$H_m = e^{(855,14 - 0,00172 C_{\text{ме}})} D_k^{\frac{C_{\text{ме}}}{698,0 + 2,0133 \cdot C_{\text{ме}}}} \text{ кг/мм}^2. \quad (2-21)$$

Проверка расчетов H_m по формуле (2-21) показала высокую сходимость результатов ($\pm 1\%$) с данными эксперимента.

Влияние температуры (t) раствора хлоридов железа на H_m покрытий. Исследования автора показали, что вязкость, плотность, электропроводность раствора хлоридов железа, а также подвижность ионов в них находятся в прямопропорциональной зависимости от t .

Следовательно, имеется основание предположить, что изменение H_m пропорционально приращению t раствора и не зависит от начального условия осаждения железа.

Приращение функции $H_m = f(t)$ есть ΔH для любого t пропорциональное приращению независимой переменной Δt :

$$\Delta H = a \cdot \Delta t, \quad (2-22)$$

где a — некоторая постоянная.

При $t = 0$ функция $f(t)$ равна H_0 , т. е.

$$f(0) = H_0, \quad (2-23)$$

где H_0 — начальная величина функции.

Дадим аргументу какое угодно новое значение t_1 . Функция получит новое значение:

$$H_m = f(t_1). \quad (2-24)$$

Приращение аргумента составит:

$$\Delta t_1 = t_1 - 0 = t_1, \quad (2-25)$$

а приращение функции будет:

$$\Delta H = H_m - H_0. \quad (2-26)$$

По условию:

$$H_m - H_0 = at, \quad (2-27)$$

откуда:

$$H_m = H_0 + at, \quad (2-28)$$

где:

H_m — микротвердость покрытий, кг/мм^2 ;
 H_0 — микротвердость покрытий, которая бы получилась при $t=0^\circ\text{C}$, если бы имелись возможности вести электролиз;
 t — температура электролита, $^\circ\text{C}$;
 a — константа, показывающая изменение H_m при нагревании электролита на 1°C .

Величины H_0 и a рассчитаны и приведены в табл. 19.

Таблица 19
Влияние t электролита на величины H_0 и a

$C_{\text{ме}}, \text{г/л}$ ($\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	$H_0, \text{кг/мм}^2$	a
200	815,0	— 3,500
300	776,5	— 3,540
450	767,5	— 3,750
680	746,0	— 4,625

Таблица 20
Влияние температуры электролита на H_m покрытий
($D_k=40 \text{ а/дм}^2$, $\text{HCl}=1,5 \text{ г/л}$)

Темпе- ратура элект- ролита (t °C)	C ме, г/л (FeCl ₃ ·4H ₂ O)							
	200		300		450		680	
	микротвердость покрытий, Н _М , кг/мм ²							
	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
50	640	640	600	600	580	580	515	515
60	605	610	564	560	543	550	469	470
70	570	580	528	530	505	505	422	420
75	552	541	521	520	486	468	400	400
80	535	540	493	500	467	470	376	375
90	500	500	458	465	430	430	330	330

Примечание: H_0 и a определены для $D_k=40 \text{ а/дм}^2$.

Знак «—» перед константой a указывает на то, что нагрев электролита способствует снижению H_m покрытий. С целью внесения коррективов на температуру электролита при значении D_k , отличном от 40 а/дм^2 , следует использовать метод интерполяции и пересчитать величины коэффициентов к конкретным условиям.

Значения расчетных величин микротвердостей покрытий по формуле (2-25) и найденных экспериментальным путем имеют разброс в пределах ошибки опытов (табл. 20).

6. Определение наивыгоднейшей объемной плотности тока

Производительность ванн или других гальванических установок осталивания определяется количеством используемого электролита, заключенного в объеме установки. В настоящее время не имеется достаточно точных рекомендаций о том, какую силу тока следует пропускать на каждый литр электролита установки в процессе электролиза.

Нам представляется целесообразным характеризовать весь рабочий объем электролита объемной плотностью тока (D_0). Под объемной плотностью тока (D_0) подразумевается величина силы тока, приходящаяся на один литр электролита в процессе электролиза.

Таблица 21
Изменение D_0 в условиях производства.

Катодная плотность тока (D_k) а/дм^2	Объемная плотность тока (D_0), а/л
20	0,1—0,9
30	0,3—1,0
50	0,6—2,5

Обследование ряда авторемонтных заводов, занимающихся восстановлением деталей осталивания (АРЗ-2, г. Омск; КАРЗ-1, г. Киев; завод «Энергомаш», г. Волжский; АРЕМЗ, г. Москва), показало, что величина объемной плотности тока в условиях производства изменяется в широких пределах (табл. 1).

На обследованных авторемонтных заводах имеется ограниченное количество ванн (в основном по одной, только в не-

которых случаях встречаются по две работающих ванны (осталивания) объемом 900—2000 л. В то время, как восстанавливаемые детали машин имеют различные размеры и формы сложности, как правило, все эти детали восстанавливаются в одной ванне. Количество деталей в одном завесе естественно изменяется, чем и объясняется широта разброса величины D_0 .

С целью разработки рекомендаций по выбору D_0 и условий на загрузку ванн осталивания под руководством автора были проведены исследования И. Д. Шинковским по влиянию D_0 на показатели технологического процесса осталивания.

За основной показатель влияния D_0 на параметры электролиза было принято время до начала дендритообразования. Рост дендритов приводит к перераспределению тока по поверхности катода [4], и скорость роста покрытий по толщине резко падает, а далее почти прекращается совсем, и наблюдается только формирование дендритов.

Качество получаемого в процессе электролиза осадка контролировалось постоянно специальным оптическим прибором.

Для оценки влияния D_0 на экономичность процесса дополнительно исследовались катодный выход железа по току и расход соляной кислоты.

Результаты исследований представлены в таблице 22.

Вся поверхность покрытий имела питтинг.

Из анализа табл. 22 следует, что влияние величины D_0 на τ_g выражается не однозначно. С повышением D_0 от 1 до 2 а/л величина τ_g увеличивается и достигает максимума. Дальнейшее повышение D_0 до 3 а/л значительно, по сравнению с $D_0=2$ а/л, снижает τ_g .

С повышением температуры электролита (t) увеличивается τ_g и наибольших значений τ_g достигает при $t=90^\circ\text{C}$. Эту закономерность представляется возможным объяснить тем, что с повышением t интенсифицируется подвижность ионов и возрастает электропроводность электролита, а это способствует, в свою очередь, облегчению разряда ионов железа.

С изменением кислотности электролита с 1 до 2 г/л HCl величина τ_g увеличивается незначительно, но дальнейшее повышение HCl до 3 г/л снижает τ_g , примерно, на $1/3$ от первоначальных значений. Отсюда следует, что кислотность лучше поддерживать в границах 1—2 г/л, т. к. предположительно при этих условиях проявляется наилучшая рассеивающая способность электролита.

Максимальных значений τ_g достигает при $D_0=2$ а/л. При этом уменьшается $\alpha_{\text{к}}^{\text{Fe}}$ на 15—20%, по сравнению с $D_0=1$ г/л,

Таблица 22

Влияние D_0 , температуры электролита ($t^\circ\text{C}$) и HCl на время начала образования дендритов
($C_{\text{ме}}=300$ г/л, $D_{\text{к}}=40$ а/дм²)

Объемная плотность тока (D_0), а/л	Кислотность электролита (HCl), г/л	Температура электролита, $t^\circ\text{C}$	Время до начала дендритообразования (τ_d), мин
1	1	40	55
		60	85
		75	105
		90	120
	2	40	70
		60	85
		75	105
		90	150
	3	40	50
		60	60
		75	75
		90	90
2	1	40	55
		60	90
		75	120
		90	150
	2	40	60
		60	90
		75	120
		90	180
	3	40	50
		60	60
		75	65
		90	75
3	1	40	45*
		60	45
		75	75
		90	80
	2	40	60
		60	75
		75	90
		90	100
	3	40	50*
		60	50
		75	60
		90	75

(рис. 40), но в два раза увеличивается сила тока, подаваемая на клеммы ванны, и почти на столько же увеличивается $\alpha_{\text{к}}^{\text{Fe}}$, что значительно компенсирует потери от снижения $\alpha_{\text{к}}$.

При $D_0=3$ а/л катодный выход по току (α_k^{Fe}) убывает на 24—30%, а τ_g уменьшается на 16%, по сравнению с $D_0=1$ а/л, а также убывает α_k^{Fe} на 10% и τ_g на 35—50%, по сравнению с $D_0=2$ а/л. Пропускная же способность рабочего объема электролита по току при $D_0=3$ а/л увеличивается на 300 и 50%, по отношению к $D_0=1$ а/л и $D_0=2$ а/л.

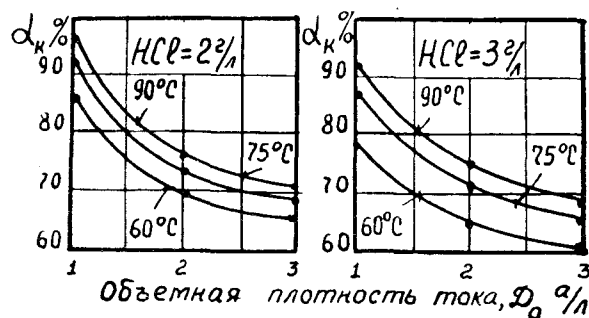


Рис. 40. Влияние D_0 на α_k ($t=75^\circ\text{C}$, $D_k=40$ а/дм²).

Из результатов эксперимента следует, что в условиях производства предпочтительнее иметь $D_0=2$ а/л, как наиболее экономически выгодное значение.

Исследование влияния C_{me} на D_0 показало, что характер кривых τ_g похож по форме на вид кривых удельной электропроводности раствора хлоридов железа и при $C_{me}=320—360$ г/л проходит через максимум. Это подтверждает, что концентрация $C_{me}=300—360$ г/л обладает наиболее выгодной энергетикой процесса.

Процесс электроосаждения железа не является стационарным, т. к. в период всего времени электролиза меняется граница растущего металла и геометрия профиля поверхности катода. Высказанные соображения подтверждаются полученными результатами исследований.

Условия и режимы электролиза при осталивании влияют как на увеличение значений показателей τ_g и α_k^{Fe} , так и на их уменьшение. Эти особенности можно объяснить с позиций диффузной теории выравнивания [7]. Визуальные наблюдения выделения водорода (H_2) при электролизе показали, что с повышением D_0 выделение H_2 интенсифицируется и растет расход соляной кислоты (рис. 41). Увеличение количества

выделения H_2 при $D_0=2$ а/л, по сравнению с $D_0=1$ г/л, повышает концентрацию H_2 на выступах поверхности катода, и этим создается дополнительное сопротивление разряду ионов железа. Этим и вызывается перераспределение тока в сторону углублений поверхности катода. Ионы железа при этом легче осаждаются во впадинах, чем на выступах микрорельефа поверхности, и τ_g достигает максимальных значений.

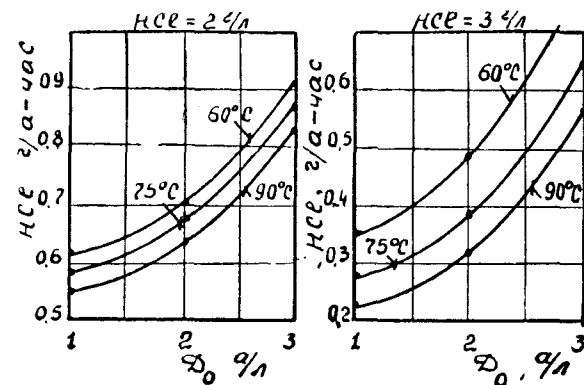


Рис. 41. Влияние D_0 на расход кислоты HCl ($t=75^\circ\text{C}$, $D_k=40$ а/дм²).

С дальнейшим повышением D_0 до 3 а/л количество H_2 возрастает, а доставка разряжающихся ионов железа затрудняется (α_k^{Fe} падает), что порождает условия неодинаковой скорости роста кристаллов по поверхности катода. В местах, где требуется меньшая энергия разряда ионов железа, возникают преимущественно центры кристаллизации. Избирательный характер кристаллизации ионов железа по поверхности катода создает предпосылки к ускорению роста дендритов (τ_g снижается).

7. Сущность выбора рациональных режимов электролиза

Совокупность изложенных результатов исследований долговечности, физико-механических свойств электролитического железа, параметров электролиза, влияющих на эти свойства, показывает, что долговечность покрытий электролитического

железа определяется режимами электролиза. Поэтому условиям и режимам электролиза следует уделять большое внимание в повседневной практике восстановления изношенных поверхностей деталей.

Нахождение исходных данных следует начинать с анализа работы восстанавливаемых изношенных поверхностей деталей. Необходимо установить марку сопряженного подшипникового металла, с которым будет работать электролитическое железо, величину износа и отклонение геометрической формы восстанавливаемой поверхности.

На основе марки сопряженного подшипникового материала следует установить величину микротвердости покрытий электролитического железа (табл. 7, глава 1).

Микротвердость электролитического железа однозначно определяет других свойств — таких, как трещиноватость, напряженность, однородность структуры. Поэтому следует со всей ответственностью подойти к определению условий электролиза.

Выбор условий электролиза начинают с концентрации соли железа в электролите. Предпочтение во всех случаях следует отдавать электролитам с псевдостационарными свойствами по концентрации соли железа, т. е. $300 \text{ г/л FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Этот электролит быстро входит, с учетом специфики производства, в псевдостационарное состояние и не требует корректировок.

Кислотность электролита оказывает большое влияние на качество покрытий и определяет экономичность процесса. Кислотность в процессе электролиза меняется, поэтому она имеет величину допустимого интервала.

Верхний предел $\text{HCl} = 3 \text{ г/л}$ установлен из экономических соображений [12]. Электроосаждение железа на катоде происходит с одновременным разряжением водорода. С повышением $\text{HCl} > 3 \text{ г/л}$ резко увеличивается количество разряжающего водорода и падает выход железа по току.

Нижний предел $\text{HCl} = 1,1 \text{ г/л}$ выбран по качественным характеристикам структур электролитического железа. При $\text{HCl} < 1,1 \text{ г/л}$ происходит сильное зашлаковывание прикатодного слоя. Гидроокись, образующаяся в прикатодном слое, включается в покрытия и этим ухудшает их структуру.

Температура электролита существенно влияет на структуру электролитического железа.

При температурах электролита до 70°C покрытия получают сильно разрушенными и имеют следы

гидроокиси. Основным фактором, влияющим на H_m , при этом является кислотность электролита.

При температуре электролита выше 70°C скачкообразно улучшаются качество структуры и физико-механические свойства электролитического железа. В этих условиях H_m покрытий в основном определяется величиной потенциала осаждения железа [10].

Рациональной температурой электролита следует считать $t = 75^\circ\text{C}$.

Определенные условия электролиза ($C_{\text{ме}}$, HCl , $t^\circ\text{C}$) должны, по возможности, оставаться постоянными, т. е. неизменными во времени. Это обеспечивает воспроизводимость структур при восстановлении деталей.

Выбор режимов электролиза начинают с определения катодной плотности тока (D_k). D_k есть регулируемый параметр, который определяет величину микротвердости электролитического железа. Катодная плотность тока задается из установленного ранее значения H_m . Зная величину H_m и условия электролиза, необходимо рассчитать значения D_k по формуле (2-14).

Величину объемной плотности тока (D_0) следует, по возможности, принимать равной 2 а/л .

Выбор начальной плотности тока ($D_k^{\text{нач}}$) следует производить в зависимости от $C_{\text{ме}}$ (табл. 13) и HCl (рис. 39).

После расчетов и определений условий, режимов электролиза следует приступить к составлению технологических процессов на восстанавливаемые детали и к расчету коэффициентов загрузки ванн или вневанных установок осталивания (см. гл. III).

Глава III

ОСНОВЫ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

1. Теоретическое обоснование номенклатуры восстанавливаемых деталей

С целью обоснования объема работ и расчета оборудования цеха по восстановлению изношенных поверхностей деталей необходима номенклатура деталей, подлежащих восстановлению по каждой марке и типу машин.

Реальная машина состоит из конечного количества деталей. Детали в любой реальной машине возможно подсчитать и выразить натуральным числом, являющимся числом ее деталей. Опишем число деталей в машине конечным множеством M [6], а детали, входящие в семейство номенклатур, множеством D .

Следовательно, имеем два множества:

$$D(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$M(Y_1, Y_2, \dots, Y_n), \quad (3-1)$$

где: $X_1, X_2, \dots, X_n$ и $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ — элементы множеств.
Множество

$$D = \bigcup_i D_i; \quad (3-2)$$

где:

$\bigcup$ — знак объединения;

i — число номенклатур, по которым необходимо разбить элементы (детали) множества M .

Множество считается заданным, если для определенного элемента можно судить, входит ли он в него. Множество задается одним или несколькими отношениями. Задать отношение — значит установить образ или эталон и показать, между какими элементами множества он выполняется.

Примем, что X является эталоном для Y , а A — количество пар, для которых принятое соотношение выполняется. В этом случае:

1) для любого Y существует эталон X , т. е.

$$(XAY); \quad (3-3)$$

2) для XAY возможно XAX , т. е. любой эталон является эталоном для самого себя; (3-4)

3) для XAY возможно zAY , т. е. $X \equiv z$ — эталон единствен. (3-5)

Отношением будем называть упорядоченную пару:

$$\langle A, M \rangle, \text{ где} \quad (3-6)$$

$$A \subseteq M \times D \quad (3-7)$$

$\subseteq$ — знак включения;

$M \times D$ — область задания отношения A ;

M — множество, на котором определено отношение.

Между элементами базисных множеств M и D имеется некоторая совокупность упорядоченных пар, т. к. первая и вторая компоненты соответственно принадлежат множеству M и множеству D . Указанная связь между множествами называется бинарным отношением.

Используя элементы абстрактной алгебры [5], возможно номенклатуру восстанавливаемых деталей описать математической моделью:

$$\omega = \langle M_{i-1}; A_1, \dots, A_m \rangle, \quad (3-8)$$

где:

M_{i-1} — некоторое множество;

$A_1, \dots, A_m$ — отношение на M_{i-1} .

При постановке реальной машины в ремонт из множества M ее деталей часть бывает годна для дальнейшей эксплуатации (класс подмножеств M_1), часть подлежит замене новыми (класс подмножеств M_2), а часть деталей представляется возможным восстановить (классы подмножеств M_i). Итак, конечное множество представляет систему непустых подмножеств:

$$\{M_1 M_2, \dots, M_{i-1}\}, M_i\} \quad (3-9)$$

или

$$M = M_1 U M_2 U \dots U M_{i-1} U M_i, \quad (3-10)$$

где

i — способы и методы восстановления деталей.

Для разбиения множества M на классы подмножеств $\{M_1, M_2, \dots\}$ соответственно UD_i , необходимо и достаточно иметь отношения эквивалентности [14].

Отношение A на множестве M называется эквивалентностью, если оно рефлексивно, симметрично и транзитивно [14].

Аксиматическое определение каждого класса подмножества влечет за собой определение установившегося транзитивного замыкания ($\hat{A}$) отношения A .

Соотношение XAY выполнено, если из:

$M: z_0 = X_1, z_1, \dots, z_n = Y$, а между членами выполняются отношения:

$$z_0 A z_1, z_1 A z_2, \dots, z_{(n-1)} A z_n, \quad (3-11)$$

$$\text{при } (n=1): z_0 = X \text{ и } z_1 = Y, \quad (3-12)$$

$$\text{из (3-9) имеем; } \hat{A} \subseteq A; \quad (3-13)$$

$$\text{при } n=2 \text{ имеем } XAz \text{ и } zAY \text{ или } XAAU, \quad (3-14)$$

$$\text{при } n=n \text{ имеем } XA^n Y. \quad (3-15)$$

Из (3-15) следует, что транзитивное замыкание отношения A — объединение всех его степеней, т. е.

$$\hat{A} = AUA^2U \dots UA^n. \quad (3-16)$$

Бинарные отношения на конечном множестве задаются способом построения матриц.

Из ранее изложенного, следует, что множество M состоит из n -го количества элементов $(1, 2, \dots, n)$, а A — отношение на нем. Матрица будет состоять из i -строк и j -столбцов. Пересечение i -й строки и j -го столбца дает единицу, если выполняется соотношение $X_i A X_j$ и 0 в других случаях.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется } X_i A U_j, \\ 0, & \text{если не выполняется } X_i A U_j, \end{cases} \quad (3-17)$$

где a_{ij} — обозначение матрицы.

Матрица $a_{ij} \equiv 1$ — задается полное отношение MXD , матрица $a_{ij} = 0$ — задается пустое отношение.

При $i = j$, $a_{ij} = 1$.

$i \neq j$, $a_{ij} = 0$.

$$(3-18)$$

Матрице соответствует диагональное отношение E (E — символ, выполняющий значение 1) или отношение равенства:

XEU , т. е.

$$\| \delta_{ij} \| = \begin{vmatrix} 100000 \\ 0 \dots 00 \\ \dots \dots \dots \\ 00 \dots 10 \\ 00 \dots 01 \end{vmatrix}. \quad (3-19)$$

В матричной форме (3-19) симметричное отношение выражают элементы, которые симметричны относительно главной диагонали и равны между собой, т. е. от перемены мест элементов значение матрицы не меняется:

$$a_{ij} = a_{ji}. \quad (3-20)$$

Симметричность отношения A следует понимать как

$$A = A^{-1}, \quad (3-21)$$

или если выполнено соотношение XAY , то выполняется и соотношение YAX . Если X эталон Y , то и Y эталон X . При $E \in A$ (3-21a)

отношение рефлексивно. Рефлексивность отношения выполняется между объектом и им самим: XAX . Рефлексивное отношение представляется матрицей (3-19), у которой главная диагональ состоит из единиц [5]. Рефлексивность отношений следует рассматривать как наличие общего эталона с подмножеством M_{i-1} множества M .

Следовательно, каждый класс (3-9) эквивалентности M_{i-1} состоит из всех элементов, имеющих общий эталон X_{i-1} .

Из (3-4) имеем $X_{i-1} A X_{i-1}$,

откуда:

$$X_{i-1} \in M_{i-1}, \quad (3-22)$$

где $\in$ — знак принадлежности.

Отношение A всегда можно задать разбиением множества на классы подмножеств в соответствии с эталоном каждого класса.

Разбиение множества M на семейства номенклатур — есть совокупность D подмножеств, удовлетворяющих трем условиям:

1) каждое подмножество из D не пустое:

$$(\bigwedge U)(U \in D \rightarrow U \neq \emptyset), \quad (3-23)$$

где

$\bigwedge$ — конъюнкция (элемент математической логики, который показывает, что из 2-х высказываний A, B имеется новое высказывание, которое считается истинным, если A и B — истинны, и ложным, если одно из них ложно);

$\rightarrow$ — импликация (элемент математической логики, который показывает, что из 2-х высказываний A, B имеется A и B новое высказывание, считаемое ложным, если A истинно и B ложно, при всех других логических значениях — истинным. A — посылка, а B — следствие импликации);

2) объединение совокупности $D = D_1 U, D_2 U, \dots$ совпадает с множеством:

$$M : \bigcup D = M; \quad (3-24)$$

3) различные подмножества из D не пересекаются:

$$(\bigwedge U_1, U_2)[(U_1 \in D \wedge U_2 \in D \wedge U_1 \neq U_2) \rightarrow U_1 \cap U_2 = \emptyset]. \quad (3-25)$$

Рассмотрим удовлетворение трем условиям (3-23) — (3-25), когда A — эквивалентность, определенная на множестве M . Совокупность всех срезов A через элементы множества M будет фактор-множеством M/A . Каждый срез A через элемент множества M :

$$A < U > = (\subset U)[(X, Y) \in A] \quad (3-26)$$

будем называть классом, а его элементы (детали) — представителями данного класса.

Ввиду рефлексивности A каждый элемент:

$$U_1 \in M. \quad (3-27)$$

и эквивалентен себе (3-3) — (3-5), а также принадлежит срезу A через этот же элемент:

$$U_1 \in A < U_1 >. \quad (3-28)$$

Из (3-28) получаем, что каждый класс A не пуст и каждый элемент множества M принадлежит некоторому классу A . Предположим, что существует элемент U_0 множества M , принадлежащий двум разным классам A , классам:

$$A < U_1 > \quad (3-29)$$

и

$$A < U_2 >. \quad (3-30)$$

Тогда будут справедливы соотношения:

$$U_1 \equiv U_0 \quad U_2 \equiv U_0 \quad (3-31)$$

и будет существовать элемент U_3 множества M , принадлежащий одному из этих классов и не принадлежащий другому. Например:

$$U_3 \in A < U_1 >. \quad (3-32)$$

и

$$U_3 \notin A < U_2 >. \quad (3-33)$$

Из (3-29, 3-30) имеем:

$$U_1 \equiv U_3 \text{ и } U_2 \neq U_3. \quad (3-34)$$

Воспользуемся симметричностью и транзитивностью A и получим из (3-31, 3-34)

$$U_2 \equiv U_3, \quad (3-35)$$

что противоречит (3-34).

Противоречие (3-34) доказывает, что ни один элемент множества M не принадлежит двум разным классам A .

Вывод. Каждый класс эквивалентности определяется любым одним его представителем.

Пусть φ — отображение множества D в множество M . Ядром φ будем называть совокупность всех упорядоченных пар (A_φ) , образованных из элементов множества D , эталоны которых при отображении φ совпадают:

$$A_\varphi = d / ((X, X')) (\varphi(X) = \varphi(X')). \quad (3-36)$$

Из (3-36) следует, что ядро A_φ есть бинарное отношение между элементами множества M , удовлетворяющее условиям рефлексивности, симметричности, транзитивности (3-16), (3-20), (3-21a).

Рассмотрим отображение φ множества M на данное разбиение D такое, что эталоном каждого элемента множества M является класс разбиения D , содержащий этот элемент

$$\varphi(X) = M_i \leftrightarrow (M_i \in D \wedge X \in M_i), \quad (3-37)$$

где $\leftrightarrow$ — эквивалентность.

Покажем, что фактор-множество M/A_φ совпадает с разбиением D . Если Y_0 — элемент множества M , тогда класс M_0 разбиения D содержит Y_0 . Учитывая срез бинарного отношения (3-26) и эквивалентность (3-27), имеем:

$$A_\varphi < Y_0 > = (C Y)[\varphi(y) = Y_{(y_0)}] = \\ = (C Y)[\varphi(y) = M_0] = M_0. \quad (3-38)$$

Из (3-38) следует, что каждый класс эквивалентности A является классом данного разбиения D . Если M_1 один из классов разбиения D , то существует элемент Y_1 множества M , принадлежащий M_1 .

В итоге имеем:

$$M_1 = A_\varphi < Y_1 >. \quad (3-39)$$

Общий вывод. Для определения деталей машин, входящих в семейство каких-либо номенклатур, необходимо и достаточно:

- а) выявить или установить критерии, определяющие эталон каждого класса номенклатуры;
- б) найти отношение эталона на множестве, описывающем реальную машину, и установить эквивалентность этого эталона данному классу разбиения.

2. Определение номенклатуры восстанавливаемых деталей

Осталиванием в настоящее время восстанавливают только те поверхности у деталей, которые обладают рядом свойств. Эти свойства можно описать следующими критериями:

1) **Критерий геометрической формы** (X_1), который показывает, что осталиванием восстанавливаются только охватывающие и охватываемые цилиндрические поверхности и другие поверхности несложных форм;

2) **Критерий габаритов** (X_2), который показывает, что пояски шириной до 5 мм и отверстия диаметром до 20 мм восстанавливать осталиванием нецелесообразно;

3) **Критерий дефектности** (X_3), который показывает, что детали с трещинами, изломами, забоинами и другими нарушениями целостности непосредственно не восстанавливаются;

4) **Критерий остаточной долговечности** (X_4), который показывает, что восстанавливаемая деталь, за исключением изношенной поверхности, имеет достаточную гарантийную прочность, т. к. при осталивании прочность к исходной не возвращается.

Для определения номенклатуры деталей, поверхности которых восстанавливаются осталиванием, введем следующие обозначения:

M — множество, описывающее детали автомобиля,

M_{i-2} — подмножество множества M , описывающее номенклатуру восстанавливаемых деталей.

На основе критериев составим эталон в матричной форме:

$$|\delta_{ij}| = \left\| \begin{array}{cccc|c} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \end{array} \right\| j. \quad (3-40)$$

В точках пересечения i и j имеем значения 1. Где: i — критерии, которые характеризуют поверхности деталей, восстанавливаемых осталиванием;

j — номера критериев по порядку.

Из анализа (3-40) следует, что $i=j=1, 2, 3, 4$, замена a_{ij} на a_{ji} значение матрицы не меняется ($A=A^{-1}$).

Решая матрицу (3-40), имеем:

$a_{ij} = 1$, т. е. выполняется условие (3-17).

Матрице соответствует диагональное отношение E или отношение равенства $X \equiv Y$. На основании (3-16), (3-20), (3-21-а) имеем отношение эквивалентности, т. е. отношение A транзитивно, симметрично, рефлексивно.

Разбиение множества M на основании найденного эталона удовлетворяет трем условиям (3-23), (3-24), (3-25):

1) номенклатура деталей представляет не пустое подмножество M_{i-2} множества M ; 2) детали номенклатуры и реальной машины полностью совпадают между собой; 3) детали данного класса номенклатуры не совпадают с деталями других классов номенклатур. Например, номенклатура восстанавливаемых деталей не совпадает с номенклатурой деталей, годных без ремонта, и т. д.

В итоге имеем, что если M — класс данного разбиения, то существуют элементы (детали) множества M , принадлежащие этому классу (если критерий есть истина).

Ориентировочно критериями, характеризующими детали класса подмножества M_1^* множества M , будут:

* Класс деталей, годных без ремонта.

1) критерий размеров (X_1), который показывает соответствие размеров сопряженных поверхностей допусковым;

2) критерий качества поверхности (X_2), который показывает соответствие класса чистоты поверхности заданному чертежом;

3) критерий надежности (X_3), который показывает отсутствие на деталях дефектов, снижающих их прочность и долговечность.

Матрица в этом случае имеет вид:

$$\|a_{ij}\| = \left\| \begin{matrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{matrix} \right\| \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \} j, i = 1, 2, 3. \quad (3-41)$$

Решая (3-41), имеем: $a_{ij} = 1$.

Эквивалентность отношения (A_1) доказана выше.

Для деталей класса подмножества M_2 множества M критерии, характеризующие эталон данного класса разбиения будут противоположны критериям класса разбиения M_1 и класса разбиения M_{2-i} , где: M_1 — класс деталей (номенклатура), годных без ремонта;

M_2 — класс деталей (номенклатура), подлежащих замене новыми.

Из приведенных примеров следует вывод о порядке вычисления и исключения критериев.

1) Для полного описания эталона класса разбиения должно быть достаточно критериев.

2) Каждый критерий — истинен и принадлежит только данному классу.

3) Критерии каждого класса обязаны исключать друг друга, соответствовать равенству (3-25).

По разработанному эталону (3-40) была определена номенклатура деталей, поверхности которых восстанавливаются осталиванием, по основным маркам базовых автомобилей. Результаты сведены в приложении 1 [17].

Коэффициенты восстановления деталей, входящих в номенклатуру (приложение 1), были позаимствованы с авторемонтных заводов г. Москвы и Московской области. Коэффициенты выборочно проверялись на соответствие в условиях производства.

Многие детали, указанные в номенклатуре, кроме поверхностей, восстанавливаемых осталиванием, дополнительно име-

ют сложные поверхности типа шлицев, резьб, кулачков, шпоночных пазов и др. С целью восстановления всех дефектов, имеющихся на изношенных поверхностях, следует вводить сопутствующие методы восстановления. Одним из перспективных методов следует считать виброугловую наплавку.

Для нахождения удельных площадей покрытий по базовым маркам автомобилей были проведены два этапа работ. Первоначально были рассчитаны единичные площади покрытий деталей, а затем через коэффициенты восстановления с последующим суммированием определены удельные площади. Результаты расчетов сведены в таблицу 23.

Таблица 23

Приведенные удельные площади покрытий

Модели автомобилей	Сухой вес, кг		Восстанавливаемая площадь покрытий, дм^2	
	двигатель	автомобиль	на двигатель	на автомобиль
ЗИЛ-164*	380	4100	5,25	14,95
ЗИЛ-130	412	4300	6,16	15,10
ГАЗ-51	235	2710	4,78	10,44
МАЗ-200 и МАЗ-205	800	6300	6,76	20,16
ГАЗ-69 и УАЗ-450	153	1535	3,03	8,98
«Москвич-403»	119	980	4,72	8,03
«Волга»-ГАЗ-21	146	1450	3,10	5,11

В пределах базовых моделей автомобилей существует прямо пропорциональная зависимость между весом автомобилей и величиной площади покрытий. Пользуясь этой зависимостью и зная сухой вес автомобиля, можно найти площади покрытий.

Данные приложения 1 применимы только для укрупненных предварительных расчетов, т. к. в зависимости от климатических условий и условий эксплуатации автомобилей дефекты идентичных деталей неодинаковы.

3. Особенности износа восстанавливаемых поверхностей

Определение величин износов у деталей, имеющих восстанавливаемые осталиванием поверхности, проводилось в районе центрально-черноземной зоны, а также на авторемонтных заводах Москвы и Московской области. Количество интервалов выбиралось [20] по формуле:

$$K \approx \sqrt{n}, \quad (3-42)$$

где:

n — величина объема выборки (принималась 25);

$K=5 \div 25$ — количество интервалов.

Расчет найденных величин производился мультипликативным способом. Среднее арифметическое ($\bar{X}$) ряда измерений определялось

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m U_m, \quad (3-43)$$

где:

h_m — абсолютная частота i -го интервала;

U_m — середина соответствующего интервала;

K — число интервалов;

n — число измерений.

Для облегчения вычислений числовых характеристик вводилась величина $\bar{X}_a$ «ложный ноль», тогда:

$$\bar{X} = \bar{X}_a + K_n, \quad (3-44)$$

где:

K_n — поправка, которая определялась:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m U_m = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m (U_m - \bar{X}_a + \bar{X}_a) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m (U_m - \bar{X}_a) + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m \bar{X}_a. \end{aligned} \quad (3-45)$$

$\bar{X}_a = \text{const}$ и не зависит от m , тогда:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m \bar{X}_a &= \bar{X}_a \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m = \bar{X}_a, \text{ т. к. } n = \sum_{m=1}^K h_m \\ \bar{X} &= \bar{X}_a + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m (U_m - \bar{X}_a). \end{aligned} \quad (3-46)$$

Из (3-46) имеем:

$$K_n = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^K h_m (U_m - \bar{X}_a). \quad (3-47)$$

С учетом длины интервала (a) выражение (3-47) примет вид:

$$K_n = \frac{d}{n} \sum_{m=1}^K h_m (U_m - \bar{X}_a). \quad (3-48)$$

После подстановки имеем

$$\bar{X} = \bar{X}_a + \frac{d}{n} \sum_{m=1}^K h_m \left(\frac{U_m - \bar{X}_a}{d} \right). \quad (3-49)$$

Из анализа литературных источников и исследований известно, что сопряжения деталей в машине при эксплуатации подвергаются различного рода нагрузкам и деформациям. Под влиянием трения и сопутствующих с ним явлений в сопряженных поверхностях деталей постепенно исчерпываются прочностные свойства и наступает период интенсивного (аварийного) изнашивания.

Износ поверхностей деталей, восстанавливаемых осталиванием, проявляется в изменении а) качества их поверхности, б) геометрических размеров и форм, в) в смещении координатных осей. Восстанавливаемые поверхности деталей работают: 1) в подшипниковых сопряжениях трения скольжения (с возвратно-поступательным и вращательным движениями), 2) в неподвижных сопряжениях подшипников качения, 3) в неподвижных, но периодически смещающихся сопряжениях (периодическое проворачивание кольца подшипника качения при пуске).

Исследования показали, что поверхности одних деталей в основном работают в сопряжениях подшипников скольжения с возвратно-поступательным движением и в неподвижных сопряжениях подшипников качения. Детали воспринимают относительно невысокие нагрузки. Износы поверхностей у деталей равномерные и не выходят за пределы 0,1 мм.

Поверхности других деталей работают в условиях средних нагрузок. Износы, как правило, асимметричные и находятся в пределах 0,2 мм.

Поверхности деталей третьей группы имеют сложную конфигурацию и работают в тяжелых условиях при высоких нагрузках. Износы поверхностей асимметричны и лежат в пределах 0,3 мм.

Поверхности деталей четвертой группы, чаще всего, являются местами под подшипники и работают в условиях переходных и подвижных посадок. Из-за больших габаритных размеров в деталях остаются в достаточном количестве внутренние напряжения, которые перераспределяются в процессе

эксплуатации и искажают исходную форму деталей. По указанной причине в деталях наблюдается смещение координатных осей и асимметричные износы, которые лежат в пределах 0,2 мм.

Результаты первичных исследований сведены в обобщающую вторичную таблицу частот (табл. 24).

Таблица 24

Величины износов восстанавливаемых поверхностей

Границы интервалов, мм	Относительная частота, %	Абсолютная накопления частота, %
До 0,10	52,1	52,1
0,10—0,20	25,5	77,6
0,20—0,30	8,7	86,3
0,30—0,40	6,9	93,2
Свыше 0,40	6,8	100,0

Из анализа табл. 24 видно, что 86,3% всех восстанавливаемых поверхностей деталей имеют износы, в пределах до 0,3 мм и лишь 13,7% имеют более высокие износы.

4. Обоснование групп восстанавливаемых деталей

Перспективным методом восстановления деталей является групповая технология, которая позволяет сократить сроки технологической подготовки производства, свести к минимуму затраты труда, материалов и средств.

Актуальным вопросом в данном случае является обоснованное выявление групп деталей, что позволяет:

1) сократить количество типов восстанавливаемых деталей;

2) повысить технологичность конструкций подвесных приспособлений;

3) создать условия по унификации технологического оборудования и оснастки;

4) создать единство нормативных показателей;

5) значительно упростить разработку технологических процессов;

6) создать предпосылки для увеличения серийности восстанавливаемых деталей;

7) решить вопросы выбора оптимального варианта производственной структуры участка, цеха;

8) обеспечить возможность автоматизации производства.

При изучении номенклатуры деталей автомобилей, тракторов и анализе производственной деятельности цехов, занимающихся восстановлением деталей осталиванием, были обнаружены существенные различия в технологическом процессе восстановления в механической обработке, в базировании и дефектовке отдельных групп деталей.

Применяемые варианты типового технологического процесса осталивания

Первый вариант состоит из операций:

1. Слесарная. Зачистка заусениц на деталях и монтаж защитных колпачков на резьбовые поверхности.

2. Обезжиривание. Детали обезжириваются в колокольной ванне с 5—10%-ным раствором серной кислоты и кварцевым песком ($\tau=20$ мин). Допускается проведение операции в смеси серной (2 части) и соляной (1 часть) кислот.

3. Моечная. Промывка деталей в холодной воде.

4. Монтажная. 1-й переход — изоляция мест, не подлежащих осталиванию. 2-й переход — монтаж деталей в подвески.

5. Обезжиривание. 1-й переход — обезжиривание поверхностей деталей венской известью или карбидным илом. 2-й переход — промывка деталей с подвесками в холодной воде.

6. Анодная подготовка. Травление деталей по одной подвеске на аноде в 30%-ном растворе серной кислоты.

7. Моечная. 1-й переход — промывка подвески с деталями в холодной воде. 2-й переход — промывка подвески с деталями в горячей воде (55—75°C).

8. Осталивание. 1-й переход — выдержать подвеску с деталями в ванне без тока (10—15 сек). 2-й переход — разогнать ванну до рабочей плотности тока (3—5 мин). 3-й переход — рабочий режим.

9. Моечная. Промывка деталей с подвесками в холодной воде.

10. Слесарная. 1-й переход — демонтаж деталей с подвесок. 2-й переход — снятие защитной изоляции с поверхностей деталей.

11. Сушильная. Сушка деталей в сушильном шкафу ($t=120^\circ\text{C}$, $\tau=10$ мин.), допускается осушение деталей сухими опилками, или обдувка сжатым воздухом.

Второй вариант состоит из таких операций:

1. Моечная. Промывка деталей в моечной ванне.
2. Предварительная обработка. 1-й переход — правка центровых отверстий. 2-й переход — механическая обработка восстанавливаемых поверхностей «на верность» с целью получения исходной геометрии.
3. Слесарная. Зачистка заусенцев и восстанавливаемых поверхностей у деталей.
4. Монтажная. 1-й переход — изоляция мест, не подлежащих осталиванию. 2-й переход — монтаж деталей в подвески.
5. Обезжиривание. 1-й переход — обезжиривание поверхностей деталей венской известью или карбидным илом. 2-й переход — промывка деталей с подвесками в холодной воде.
6. Анодная подготовка. Травление деталей по одной подвеске на аноде в 30%-ном растворе серной кислоты.
7. Моечная. 1-й переход — промывка деталей по одной подвеске в холодной воде. 2-й переход — промывка деталей по одной подвеске в горячей воде.
8. Осталивание. 1-й переход — выдержать подвеску с деталями в ванне без тока (10—15 сек). 2-й переход — разогнать ванну до рабочей плотности тока (3—5 мин). 3-й переход — рабочий режим.
9. Моечная. Промывка деталей с подвесками в холодной воде.
10. Слесарная. 1-й переход — демонтаж деталей с подвесок. 2-й переход — снятие защитной изоляции с поверхностей деталей.
11. Сушильная. Сушка деталей в сушильном шкафу ($t=120^{\circ}\text{C}$, $\tau=10$ мин), допускается осушение деталей сухими опилками.

Третий вариант состоит из операций:

1. Моечная. 1-й переход — промывка деталей в моечной машине. 2-й переход — выпаривание и очистка смазочных каналов и глубоких сверлений.
2. Дефектоскопия. Частичная или полная электромагнитная дефектоскопия деталей.
3. Предварительная обработка. Механическая обработка восстанавливаемых поверхностей «на верность» с целью получения исходной геометрии.
4. Слесарная. Зачистка заусенцев и восстанавливаемых поверхностей у деталей.

5. Монтажная. 1-й переход — изоляция мест, не подлежащих осталиванию, глушение смазочных каналов. 2-й переход — монтаж токонесущих крючков.

6. Обезжиривание. 1-й переход — обезжиривание поверхностей деталей венской известью или карбидным илом. 2-й переход — промывка деталей в холодной воде.

7* Травление. Травление по одной детали или одной подвески с деталями в ванне осталивания. ($D_a=60-80$ а/дм², $t=75^{\circ}\text{C}$, $\tau=2$ мин).

8. Моечная. Промывка деталей в холодной воде.

9. Анодная подготовка. Травление деталей на аноде в 30%-ном растворе серной кислоты.

10. Моечная. 1-й переход — промывка деталей в холодной воде. 2-й переход — промывка деталей в горячей воде.

11. Осталивание. 1-й переход — выдержать деталь или подвеску с деталями в ванне без тока (10—15 сек). 2-й переход — разогнать ванну до рабочей плотности тока (3—5 мин). 3-й переход — рабочий режим.

12. Моечная. Промывка деталей в холодной воде.

13. Слесарная. 1-й переход — демонтаж деталей от токонесущих крючков. 2-й переход — снятие защитной изоляции с поверхностей деталей.

14. Сушильная. Сушка деталей в сушильном шкафу ($t=120^{\circ}\text{C}$, $\tau=10$ мин), допускается осушение деталей сухими опилками.

Четвертый вариант состоит из операций:

1. Моечная. Промывка деталей в моечной машине.

2. Контрольная. Проверяется положение осей у восстанавливаемых поверхностей относительно привалочных плоскостей.

3. Предварительная обработка. Частичная или полная обработка восстанавливаемых поверхностей с целью исправления положения осей.

4. Слесарная. Зачистка заусенцев и восстанавливаемых поверхностей у деталей и глушение масляных каналов.

5. Обезжиривание. 1-й переход — обезжиривание поверхностей венской известью или карбидным илом. 2-й переход — промывка холодной водой.

6. Монтажная. Монтаж деталей на установку для вневанного осталивания.

* Допускается 2—3-кратное повторение операций 7, 8, 9, 10 с целью полного удаления дефектных слоев.

7. Анодная подготовка. Травление поверхностей анодным током в 30%-ном растворе серной кислоты.

8. Моечная. Промывка поверхностей пропусканием 20 л холодной воды через каждую ячейку.

9. Осталивание. 1-й переход — выдержать восстанавливаемые поверхности без тока (электролит через ячейки в это время проходит) $\tau=5$ сек. 2-й переход — довести плотность тока, поступающего на каждую ячейку, до рабочей ($\tau=5$ мин). 3-й переход — рабочий режим.

10. Моечная. Промывка поверхностей пропусканием 20 л холодной воды через каждую ячейку.

11. Слесарная. 1-й переход — демонтаж деталей с вневанной установки. 2-й переход — обдувка деталей сухим воздухом.

Применяемые технологические базы

1. В качестве базы используется сама обрабатываемая поверхность.

2. Базирование в центровых отверстиях.

3. Базирование в трех-четырёхкулачковом патроне с дополнительной базирующей поверхностью — центровым отверстием (т. е. поджим задним центром).

4. Базирование по привалочной плоскости и двум отверстиям, используются отверстия под штифты (см. рис. на стр. 97).

Применяемые методы механической обработки поверхностей

1. Бесцентровое шлифование с продольной или радиальной подачами.

2. Круглое шлифование.

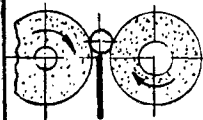
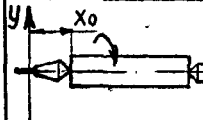
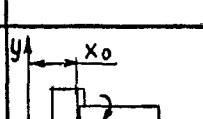
3. Тонкое точение или круглое шлифование.

4. Растачивание или внутреннее шлифование.

Состояние восстанавливаемых поверхностей

1. Равномерные относительно невысокие величины износов. Простая конфигурация деталей с малыми поверхностями изоляции.

2. Неравномерные износы с нарушением исходной геометрии. Конфигурация деталей средней сложности. Поверхности под изоляцию составляет 20—40% поверхности деталей.

№	Схемы базирования	Класс точности					Класс чистоты поверхности	Rz, мкм
		3a	3	2a	2	1		
I		Бесцентровое шлифование с продольной или радиальной подачами					▽7-10	6,3-0,80
II		Круглое шлифование					▽7-9	6,3-1,6
III		Тонкое точение Круглое шлифование					▽8-10 ▽7-9	3,2-0,80 6,3-1,6
IV		Растачивание или внутреннее шлифование					▽7-9	6,3-1,6

3. Скрытые трещины усталостного характера, неравномерные износы. Сложные поверхности изоляции, которые составляют в некоторых случаях до 70% поверхности деталей.

4. Отклонение координатных осей у восстанавливаемых поверхностей, неравномерные износы. Поверхности, не подлежащие восстановлению, не изолируются.

Анализируя приведенные технологические особенности, используемые при восстановлении поверхностей деталей, представляется возможным, на основе принципа тяготения и подчиненности, их совокупить.

Дополнительно при разработке эталонов, определяющих каждую группу деталей, использовался метод приближений, разработанный проф. С. П. Митрофановым [13].

Первая группа признаков: первый вариант технологического процесса восстановления; в качестве базы при механической обработке используется сама обрабатываемая поверхность;

механическая обработка поверхностей бесцентровым шлифованием с продольной или радиальной подачами; состояние восстанавливаемых поверхностей — равномерные относительно невысокие износы, конфигурация деталей простая с малыми поверхностями изоляции.

Вторая группа признаков: второй вариант технологического процесса восстановления; базирование в центральных отверстиях; механическая обработка поверхностей круглым шлифованием; состояние восстанавливаемых поверхностей — неравномерные износы с нарушением исходной геометрии, конфигурация деталей средней сложности, поверхности под изоляцию составляют 20—40% поверхности деталей.

Третья группа признаков: третий вариант технологического процесса восстановления; базирование в трех-четырёхкулачковом патроне с дополнительной базирующей поверхностью; механическая обработка поверхностей, тонкое точение или круглое шлифование; состояние восстанавливаемых поверхностей — скрытые трещины усталостного характера, неравномерные износы; сложные поверхности изоляции, которые в некоторых случаях до 70% поверхности деталей.

Четвертая группа признаков: четвертый вариант технологического процесса восстановления; базирование по привалочной плоскости и двум отверстиям (под штифты); механическая обработка поверхностей — растачивание или внутреннее шлифование; состояние восстанавливаемых поверхностей — отклонение координатных осей, неравномерные износы. Поверхности, не подлежащие восстановлению, не изолируются.

На основе полученных обобщений представляется целесообразным номенклатуру деталей, описанную подмножеством M_{i-2} множества M , разбить на четыре группы. Для разбиения подмножества M_{i-2} необходимо задать четыре отношения-эталоны A_1, A_2, A_3, A_4 . Составим четыре матрицы:

$$\| \delta_{ij} \|_1 = \begin{vmatrix} X_1 X_2 X_3 X_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1; \quad (3-50) \quad \| \delta_{ij} \|_2 = \begin{vmatrix} X_1 X_2 X_3 X_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \quad (3-51);$$

$$\| \delta_{ij} \|_3 = \begin{vmatrix} X_1 X_2 X_3 X_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \quad (3-52); \quad \| \delta_{ij} \|_4 = \begin{vmatrix} X_1 X_2 X_3 X_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \quad (3-53).$$

Здесь

$\| \delta_{ij} \|_{1,2,3,4}$ — матрицы, составленные на основании групповых признаков;

x_1, x_2, x_3, x_4 — номера признаков каждой группы.

Матрицы (3—50) — (3—53) имеют однозначное решение:

$$(\delta_{ij})_1 = 1; \quad (\delta_{ij})_2 = 1; \quad (\delta_{ij})_3 = 1; \quad (\delta_{ij})_4 = 1, \quad (3-54)$$

т. е. выполняется условие (3—17).

Во всех случаях (3—42), (3—43), (3—44), (3—45) $i=j=1, 2, 3, 4$, а замена $a_{ij} = a_{ji}$ (3—55)

значения матриц не меняет, т. е.

$$A_1 U A_2 U A_3 U A_4 = (A_1)^{-1} U (A_2)^{-1} U (A_3)^{-1} U (A_4)^{-1}. \quad (3-56)$$

Матрицам соответствуют диагональные отношения E .

На основании (3—16), (3—20), (3—21а) имеем во всех четырех случаях отношения эквивалентности (рефлексивность, транзитивность, симметричность). Следовательно, подмножество M_{i-2} разбивается, согласно разработанным эталонам на ряд групп:

$$M_{i-2} = (M_{i-2})^{A_1} U (M_{i-2})^{A_2} U (M_{i-2})^{A_3} U (M_{i-2})^{A_4}. \quad (3-57)$$

По выдвинутым признакам и составленным эталонам имеем четыре группы деталей, поверхности которых восстанавливаются осталиванием.

Детали, вошедшие в первую группу $(M_{i-2})^{A_1}$. Толкатель клапана, вал водяного насоса, толкатель коромысел, впускные и выпускные клапаны, клапан масляного насоса, вал сошки руля, ось ведомой шестерни масляного насоса, ось блока шестерен заднего хода, шкворень, вал насоса гидроусилителя руля, вал привода распределителя зажигания, шаровой палец, ось педали сцепления, ось колодок тормозов, ось ролика рулевого управления, палец поршня, ось коромысел, промежуточный вал привода насоса, подъемного механизма.

Детали, вошедшие во вторую группу (M_{i-2})^{A₂}. Труба полуоси заднего моста, промежуточный вал коробки передач, ведомый вал коробки передач, ведущий вал коробки передач, ведущая коническая шестерня, разжимной кулак тормозов, балансирный вал, шток поршня подъемного механизма, распределительный вал.

Детали, вошедшие в третью группу (M_{i-2})^{A₃}. Поворотная цапфа, коленчатый вал двигателя, чашка коробки дифференциала, рычаг поворотной цапфы, крестовина дифференциала, карданный шарнир, ведущая шестерня заднего моста, вал рулевого сектора, коленчатый вал компрессора, поршень.

Детали, вошедшие в четвертую группу (M_{i-2})^{A₄}. Картер коробки передач, картер редуктора заднего моста, блок цилиндров, гильза цилиндра, корпус шестеренчатого насоса, ротор воздушного нагнетателя, шатун.

При наличии на производстве ЭВМ определение принадлежности восстанавливаемых деталей к той или иной группе значительно упрощается. По эталонам (M_{i-2})^{A₁}, (M_{i-2})^{A₂}, (M_{i-2})^{A₃}, (M_{i-2})^{A₄}, пользуясь методикой проф. С. П. Митрофанова [13], следует составить программу на ЭВМ и произвести расчеты. В этом случае отсутствует субъективный фактор и не требуется высокая специализация технологов, занимающихся подготовкой производства по восстановлению деталей.

5. Сочетание способов восстановления деталей при групповой технологии

Общеизвестен факт, что деталь любой машины имеет разные по форме и назначению рабочие поверхности. Покажем это на примере валов трансмиссии, которые имеют наружную цилиндрическую поверхность (шейки под подшипники качения), наружную шлицевую поверхность, наружную резьбовую поверхность (концы для крепежа), шпоночные канавки и т. д.

В силу разных назначений поверхностей деталей и различных условий работы их в сопряжениях машины в каждом конкретном случае требуются специфические физико-механические свойства этих поверхностей. Следовательно, и изношенные поверхности деталей могут иметь разнообразные сочетания сложности профилей и форм (цилиндрические,

конические охватывающие и охватываемые поверхности, шлицевые, зубчатые, сферические, резьбовые и другие поверхности сложной формы).

С точки зрения долговечности, экономичности [8], цилиндрические, конические охватываемые и охватывающие изношенные поверхности деталей целесообразно восстанавливать осталиванием. Изношенные поверхности сложных форм восстанавливать одним из способов наплавки или металлзации (табл. 25).

Таблица 25

Возможные сочетания способов восстановления изношенных поверхностей деталей

Способ восстановления	Профиль восстанавливаемой поверхности детали
Осталивание	Охватывающие и охватываемые цилиндрические, конические поверхности.
Один из способов наплавки или металлзации	Шлицы, шпоночные пазы, резьбы, зубья, кулачки и другие сложные поверхности.

Таким образом, как следует из табл. 25, изношенные поверхности деталей возможно восстанавливать сочетанием нескольких способов восстановления. На основании номенклатуры восстанавливаемых деталей (приложение 1) были проведены подсчеты удельного веса площадей сложных поверхностей деталей, восстанавливаемых наплавкой, металлзацией и т. д. Полученные данные приведены в табл. 26.

Таблица 26

Удельный вес сложных изношенных поверхностей

Марка автомобиля	Удельный вес сложных изношенных поверхностей деталей от поверхностей, восстанавливаемых осталиванием, %
ЗИЛ-164	22,0
ЗИЛ-130	22,0
ГАЗ-51	19,2
МАЗ-200 и МАЗ-205	21,2
«Волга»-ГАЗ-21	21,6

Восстанавливаемые поверхности деталей сложной формы в среднем составляют 22% от площади деталей, восстанавливаемых осталиванием.

Для полноты отражения доминирующего способа при восстановлении деталей, представленных номенклатурой приложения 1, целесообразно ввести понятия об основном и сопутствующих способах восстановления. В конкретном случае основным способом восстановления будет осталивание, а сопутствующими различные способы наплавки, металлizations.

С целью планирования объема работ сопутствующих способов восстановления по группам деталей были выполнены соответствующие расчеты (табл. 27).

Таблица 27

Удельный вес сопутствующих способов восстановления	
Номера групп восстанавливаемых деталей	Усредненные показатели удельного веса сопутствующих способов, %
I	1,6
II	8,5
III	6,6
IV	5,3

Из таблицы 27 следует, что наименьший удельный вес сопутствующих способов восстановления наблюдается у деталей I группы (1,6%) и наибольший удельный вес у деталей II группы (8,5%).

Итак, из определенной номенклатуры деталей, восстанавливаемых способом осталивания, большая часть их восстанавливается без сопутствующих способов и меньшая часть с сопутствующими способами. Из сказанного следует: у всех четырех групп деталей возможно существование двух маршрутов восстановления.

Маршрут 1. Восстановление изношенных поверхностей деталей без сопутствующих способов.

Маршрут 2. Восстановление изношенных поверхностей деталей с использованием сопутствующих способов восстановления.

Номер маршрута восстановления деталей оказывает влияние на количество и чередование операций технологического процесса. При маршруте 1 выполняются (в случае необходимости) операции предварительной механической обработки изношенных поверхностей, восстанавливаемых осталиванием, и далее идут операции подготовки и гальванического наращивания.

При маршруте 2 первоначально выполняются операции восстановления изношенных поверхностей сопутствующими способами, затем операции предварительной механической обработки этих поверхностей. Далее выполняются операции предварительной обработки «на верность» поверхностей, восстанавливаемых осталиванием, и следом выполняются гальванические операции по наращиванию на эти поверхности электролитического железа. Финишными являются операции окончательной механической обработки всех восстанавливаемых поверхностей детали.

6. Распределение толщины электролитического железа по поверхности катода

Для расчета величины припуска под механическую обработку необходимо знать величину погрешности в отклонении толщины покрытий.

Отклонение толщины покрытия от исходной геометрической формы восстанавливаемой поверхности описывается объемным вектором в цилиндрических координатах: радиусом — r , центральным углом — Θ^0 , длиной образующей — L .

Сформулируем реализацию трехмерного случайного вектора с нормальным распределением при помощи корреляционной матрицы.

Математическое ожидание:

$$M_{(r)} = a_1; \quad M_{\Theta^0} = a_2; \quad M_{(L)} = a_3. \quad (3-58)$$

Корреляционная матрица:

$$\begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}, \quad (3-59)$$

где:

$$K_{11}, K_{22}, K_{33} — \text{дисперсии случайных величин } (r, \Theta^0, L). \\ K_{12} = K_{21}; \quad K_{23} = K_{32}; \quad K_{13} = K_{31} — \text{корреляционные моменты } r \text{ и } \Theta^0 \text{ и } r, L \text{ и } \Theta^0, L. \quad (3-60)$$

Предположим, что существуют случайные числа v_i , которые имеют одномерное нормальное распределение с математическим ожиданием и дисперсией σ^2 .

$$\text{Приравниваем } r = x, \quad \Theta^0 = y, \quad L = z. \quad (3-61)$$

Возьмем из счетного множества возможных значений v_1 , v_2 , v_3 и преобразуем по (3—58) и (3—59).

Искомые составляющие случайного вектора будут:

$$\begin{aligned} X &= C_{11}(v_1 - m) + a_1, \\ y &= c_{12}(v_1 - m) + c_{22}(v_2 - m) + a_2, \\ z &= c_{13}(v_1 - m) + c_{23}(v_2 - m) + c_{33}(v_3 - m) + a_3, \end{aligned} \quad (3-62)$$

где:

C_{ij} — неизвестные коэффициенты уравнений. Из (3—59) имеем:

$$K_{11} = M[r - M(r)]^2,$$

но из (3—58)

$$\begin{aligned} M(r) &= a_1, \\ M[(v_1 - m)]^2 &= \sigma^2, \end{aligned} \quad (3-63)$$

откуда:

$$K_{11} = \sigma^2 C_{11}^2. \quad (3-64)$$

Случайные величины r , θ^0 , L не зависимы между собой, поэтому:

$$i \neq j. \quad M[(v_1 - m)(v_1 - m)] = 0, \quad (3-65)$$

по аналогии (3—63) имеем:

$$\begin{aligned} K_{12} &= c_{11} \cdot c_{12} \cdot \sigma^2, \\ K_{22} &= c_{12}^2 \cdot \sigma^2 + c_{22}^2 \cdot \sigma^2, \\ K_{13} &= c_{11} \cdot c_{13} \cdot \sigma^2, \\ K_{23} &= c_{12} \cdot c_{13} \cdot \sigma^2 + c_{23}^2 \cdot \sigma^2, \\ K_{33} &= c_{13}^2 \cdot \sigma^2 + c_{23}^2 \cdot \sigma^2 + c_{33}^2 \cdot \sigma^2. \end{aligned} \quad (3-66)$$

Решая систему уравнений (3—65) и (3—66) относительно C_{ij} , получим:

$$C_{11} = \frac{\sqrt{k_{11}}}{\sigma}, \quad (3-67)$$

$$C_{12} = \frac{k_{12}}{\sigma \sqrt{k_{11}}}, \quad (3-68)$$

$$C_{22} = \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{22} - k_{12}^2}}{\sigma \sqrt{k_{11}}}, \quad (3-69)$$

$$C_{13} = \frac{k_{13}}{\sigma \sqrt{k_{11}}}, \quad (3-70)$$

$$C_{23} = \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{23} - k_{12} \cdot k_{13}}}{\sigma \sqrt{k_{11}}}, \quad (3-71)$$

$$C_{33} = \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{33} - k_{13}^2 - k_{11} \cdot k_{23} + k_{12} \cdot k_{13}}}{\sigma \sqrt{k_{11}}}. \quad (3-72)$$

Подставив (3—67)–(3—72) в (3—62), получим статистическую модель случайных векторов:

$$r = \frac{\sqrt{k_{11}}}{\sigma} (v_1 - m) + a_1, \quad (3-73)$$

$$\theta^0 = \frac{k_{12}}{\sigma \sqrt{k_{11}}} (v_1 - m) + \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{22} - k_{12} \cdot k_{13}}}{\sigma \sqrt{k_{11}}} (v_2 - m) + a_2, \quad (3-74)$$

$$\begin{aligned} Z &= \frac{k_{13}}{\sigma \sqrt{k_{11}}} (v_1 - m) + \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{23} - k_{12} \cdot k_{13}}}{\sigma \sqrt{k_{11}}} (v_2 - m) + \\ &+ \frac{\sqrt{k_{11} \cdot k_{33} - k_{13}^2 - k_{11} \cdot k_{23} + k_{12} \cdot k_{13}}}{\sigma \sqrt{k_{11}}} (v_3 - m) + a_3. \end{aligned} \quad (3-75)$$

После моделирования параметров, характеризующих распределение покрытия, исследования были проведены на образцах $\varnothing 10$ и $\varnothing 18$ длиной $l = 10d$. Выбор длины образцов принят по данным сопротивления материалов о критических геометрических соотношениях в реальных деталях. Исходная чистота поверхности образцов была $\nabla 7$.

На равномерность распределения толщины покрытий по поверхности катода оказывают влияние как условия, так и режимы электролиза (рис. 42). Во всех случаях наблюдается неравномерность толщин покрытий по диаметру катода. Наибольшая величина толщины покрытий наблюдается по оси, направленной в сторону анодов, а наименьшая толщина покрытий — на оси, перпендикулярной к оси расположения анодов. Это явление объясняется тем, что наибольшая концентрация силовых линий имеется в первом случае и наименьшая их концентрация — во втором случае. Общеизвестен факт, что с увеличением концентрации силовых линий увеличивается скорость отложения металла.

С увеличением времени электролиза (τ) увеличивается толщина покрытия (h) и наблюдается рост отклонения $r_{\max} - r_{\min} = \Delta r$, как результат воздействия различного количества силовых линий по диаметральной поверхности катода. Погрешность, в зависимости от толщины покрытия, с

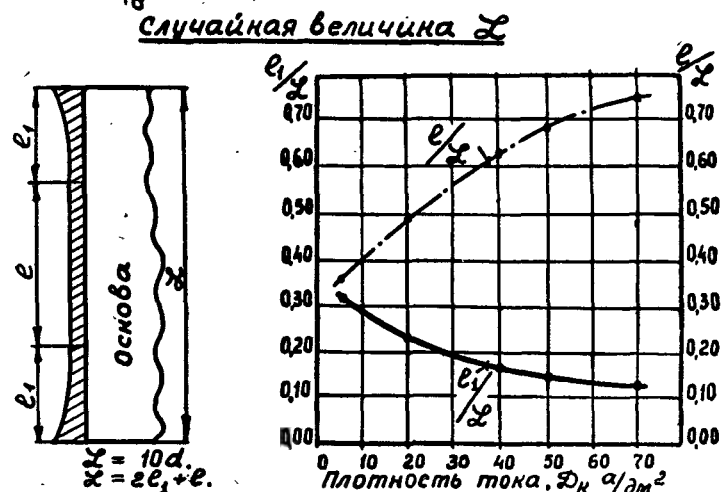
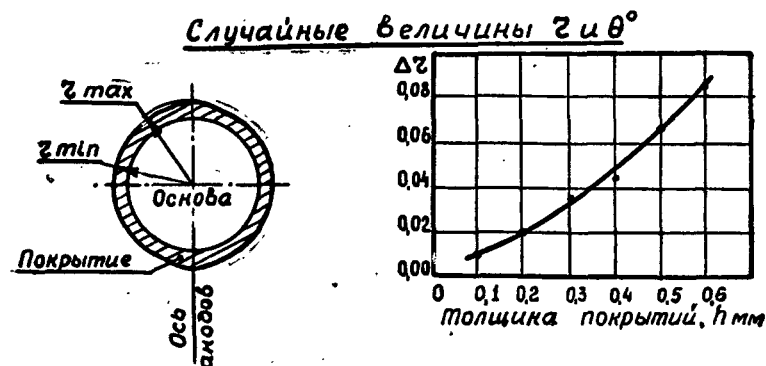


Рис. 42. Влияние параметров электролиза на распределение случайных величин r , θ° , L .

большой достоверностью описывается найденной эмпирической формулой:

$$\Delta r = 0,0269 h^{1,22}, \text{ мкм,}$$

где

Δr — погрешности на толщину покрытий, мкм;

h — толщина покрытия, мкм.

Равномерность распределения покрытий по длине катода (L) находится в прямой зависимости от плотности тока (D_k), т. е. с повышением D_k возрастает величина отношения $1/z$ и соответственно уменьшается отношение $2L/z$.

Чистота поверхности образцов после нанесения покрытий уменьшалась на 1—2 класса по сравнению с исходным. В этом случае прослеживается влияние чистоты электролита на изменение величины шероховатости покрытий. Так, при постоянной фильтрации электролита шероховатость поверхности покрытий изменяется с $R_z = 5$ мкм до $R_z = 10$ мкм, а при периодической фильтрации (1—2 раза в неделю) шероховатость изменяется с $R_z = 5$ мкм до $R_z = 15$ —20 мкм.

Класс точности у восстановленных поверхностей деталей после их наращивания железом уменьшается (так, с исходного 2-го уменьшался до 3-го класса точности). В случае, когда восстанавливаемые поверхности деталей не имели перед осталиванием предварительной механической обработки «на «верность», точность этих поверхностей после наращивания имела класс точности 3^a.

Анализ равномерности распределения электролитического железа по поверхности катода (в условиях лаборатории и производства) показал, что его неравномерность составляет 7—10% по объему. Полученные данные согласуются с лабораторными результатами М. П. Мелкова [8].

С целью компенсации геометрических отклонений формы, возникающих при электролизе, в эмпирическую формулу [9] длительности процесса следует ввести коэффициент неравномерности покрытий, т. е.

$$\tau = \frac{100 h}{D_k} \cdot K_n, \text{ час.} \quad (3-76)$$

После подстановки значений K_n , имеем:

$$\tau = \frac{100 h}{D_k} \left(1 + \frac{10}{100} \right), \text{ час.} \quad (3-77)$$

$$\text{В окончательном виде } \tau = \frac{110 h}{D_k}, \text{ час,} \quad (3-78)$$

где

τ — время электролиза, час,

h — толщина покрытия, мм,

D_k — плотность тока, $a/\text{дм}^2$,

K_n — коэффициент неравномерности покрытий (10%).

С целью улучшения равномерности покрытий рекомендуется острые кромки анодов скруглять радиусами (R 10—20 мм).

На основе изложенного, покрытия электролитического железа, нанесенные на восстанавливаемые поверхности деталей, имеют следующую характеристику:

а) величина шероховатости $R_z = 20$ мкм,

б) класс чистоты поверхности $\nabla 5$;

в) класс точности для поверхностей с предварительной механической обработкой — 3, для поверхностей без предварительной механической обработки — 3^а,

г) дефектная величина поверхностного слоя незначительна (около 3—5 мкм).

7. Расчет величины припуска покрытий под механическую обработку

Необходимость механической обработки обусловливается тем, что топология, размеры и формы восстанавливаемых поверхностей деталей только приближены к необходимым размерам и технологическим условиям на их восстановление.

К настоящему времени в условиях практики сложились четыре схемы базирования и механической обработки деталей, в зависимости от группы их восстановления. По этим основным технологическим схемам обработки ведутся дальнейшие расчеты величин припусков у покрытий под механическую обработку.

Припуском под механическую обработку следует называть слой металла, который удаляется с поверхности покрытий в процессе получения необходимых параметров детали. Припуск должен: а) компенсировать погрешности, полученные в результате наращивания изношенной поверхности детали железом; б) компенсировать погрешности, получаемые в результате выполнения рассматриваемых операций.

Устанавливать величину припуска следует для каждой операции в отдельности с учетом всех предъявляемых требований к восстанавливаемой поверхности.

Погрешности, возникающие при механической обработке поверхностей, носят сложный характер взаимодействия и зависят от многих причин. Погрешности от неточностей износа и упругих деформаций оборудования, инструмента, приспособлений,

а также получаемые искажения формы должны учитываться операционным допуском. Операционный допуск по своей величине должен соответствовать суммарной погрешности от указанных причин.

Погрешности, полученные при выполнении предыдущей операции, шероховатость поверхности, глубина дефектного слоя, остаточные напряжения, допуск отклонения размера «допуск в металл» и погрешности, полученные на данной операции, неточность базирования, от усилий зажатия должны быть компенсированы величиной припуска.

Расчет величины припуска ведем по методике, предложенной и разработанной И. Б. Плоткиным [15].

1) Погрешности величины остаточных деформаций (C) определяются:

$$C = 0,01 \cdot m \cdot l, \quad (3-79)$$

где:

m — коэффициент, зависящий от характера поверхности (выбирается по табл. 29);

l — длина поверхности, см.

Таблица 29

Значения m от характера поверхности

Характер операций	m
Получистовые	0,20—0,40
Чистовые	0,10—0,20
После осталивания	0,25—0,35

2) В процессе обработки поверхностей одни погрешности взаимодействуют с другими и их значимость уменьшается. Это взаимодействие учитывается коэффициентом перекрытия одних погрешностей другими (K),

пределы изменения $K = 0,8—1$,

при чистовых операциях $K = 1$,

при предварительных операциях $K = 0,9$.

3) Погрешности базирования:

а) в плоскости поперечного сечения

$$E_d = a \sqrt[3]{d}; \quad (3-80)$$

б) в осевой плоскости сечения:

$$E_l = 0,01 b \cdot l;$$

где:

a и b — коэффициенты точности (выбирается по табл. 30);
 d — диаметр обрабатываемой поверхности, мм;
 l — длина обрабатываемой поверхности, см.

Таблица 30

Значения коэффициентов a и b

Характер операций	Значения коэффициентов	
	a	b
Получистовые	0,05—0,10	0,3—0,6
Чистовые	0,01—0,03	0,1—0,3
Для осталивания	0,06—0,09	0,2—0,4

Общая расчетная формула величины припуска будет представлять собой суммарную величину указанных погрешностей, т. е.

$$2\Delta = K[2(R_z + T) + E_d + E_l + C + \delta], \text{ мм}, \quad (3-81)$$

где:

Δ — величина припуска на сторону, мм;
 K — коэффициент перекрытия одних погрешностей другими;
 R_z — шероховатость покрытия после осталивания, мм;
 T — величина дефектного слоя покрытия после осталивания, мм;

E_d — погрешности базирования в поперечном сечении;
 E_l — погрешности базирования в осевой плоскости сечения;

C — погрешности от величины остаточных деформаций;
 δ — допуск на размер при осталивании, мм.

Припуск для валов есть величина положительная и направлен на увеличение размера вала.

Припуск для отверстий есть величина отрицательная и направлен на уменьшение размера отверстия.

Допуск «в металл» задается для валов по системе отверстия A_3 , а для отверстий по системе вала B_3 . В том случае, когда восстанавливаемые поверхности перед осталиванием не обрабатываются «на верность», допуск для валов задается системой отверстия A_3^a , а для отверстий — системой вала B_3^a .

Общая толщина покрытия электролитического железа, наращиваемого на изношенные поверхности деталей, определяется:

$$h = \Delta h_{\text{кф}} + \Delta h_{\text{ки}} + \Delta, \text{ мм}, \quad (3-82)$$

где:

$\Delta h_{\text{кф}}$ — слой покрытия, компенсирующий нарушение геометрической формы. Определяется величиной металла, снятого с восстанавливаемой поверхности детали, при предварительной механической обработке «на верность»;

$\Delta h_{\text{ки}}$ — слой покрытия, компенсирующий износ восстанавливаемой поверхности детали;

Δ — припуск на механическую обработку.

Если при механической обработке имеется совмещение измерительных и установочных баз, то погрешности базирования равны 0. При обработке в центрах $E = a\sqrt[3]{d} = 0$. В случае обработки в патронах токарных станков без поддержки задним центром коэффициент точности выбирается на основе норм точности токарных патронов общего назначения, $a = 0,2$. Длину (l) в данном случае задают равной двойному расстоянию от удаленного торца.

Подставив в формулу (3-81) данные величин погрешностей, получим ряд расчетных формул по определению величины припуска.

а) При бесцентровом шлифовании с продольной или радиальной подачами:

$$2\Delta = 0,072 + 0,9\delta. \quad (3-83)$$

б) При круглом шлифовании в центрах:

$$2\Delta = 0,099 + 0,9\delta. \quad (3-84)$$

в) При обработке в патронах токарных станков:

$$2\Delta = 0,099 + 0,18\sqrt[3]{d} + 0,9\delta. \quad (3-85)$$

г) При расточке или внутреннем шлифовании отверстий:

$$2\Delta = 0,099 + 0,063\sqrt[3]{d} + 0,9\delta. \quad (3-86)$$

Расчеты, проведенные по формулам (3-81), (3-83), (3-84), (3-85), (3-86), при длине восстанавливаемой поверхности деталей до 100 мм, позволили найти ориентировоч-

ные величины припуска для каждой технологической схемы обработки (табл. 31).

Технологический процесс восстановления деталей имеет существенные отличия от технологического процесса их изготовления.

Таблица 31

Припуски на механическую обработку поверхностей, восстановленных электролитическим железом

Характер операций	Диаметры поверхностей, мм							
	6—10	10—18	18—30	30—50	50—80	80—120	120—180	180—260
	Припуск 2А на обработку покрытий, мм							
Чистовое растачивание или внутреннее шлифование отверстий	—	—	0,32	0,35	0,40	0,45	0,48	0,55
Чистовое обтачивание или шлифование в токарных патронах без поджатия задним центром.	—	0,56	0,66	0,75	0,87	0,99	—	—
Бесцентровое шлифование	0,13	0,15	0,15	0,16	0,18	0,19	—	—
Круглое чистовое шлифование в центрах	0,15	0,17	0,17	0,19	0,20	0,22	0,25	—
Тонкое точение в центрах	0,12	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,20

1) Если заготовкой детали на машиностроительном заводе является литье, поковка или прокат, то на авторемонтном заводе при восстановлении заготовкой является реально работавшая деталь с изношенными поверхностями контакта, имеющая высокую остаточную долговечность.

2) В начале изготовления деталей на предварительных операциях подготавливают основные или вспомогательные базы для последующей обработки. При восстановлении деталей первоначально производят выбор поверхностей для базирования. Для этой цели или принимают чистовые базы, оставшиеся при изготовлении деталей, или выбирают ремонтные базы. Ремонтными базами чаще всего служат поверхности деталей, которые не имеют больших износов и с допустимой точностью координируют детали относительно рабочих органов станков. Далее выполняются операции сопутствующих способов восстановления, а затем операции предварительной

механической обработки «на верность», с целью ликвидации погрешностей геометрических форм.

3) При изготовлении деталей последующим этапом является формирование требуемых геометрических форм поверхностей и их взаимного положения относительно друг друга.

При восстановлении деталей последующим этапом является наращивание слоя электролитического железа на изношенные поверхности. Толщина слоя рассчитывается по формуле (3—82).

4) Завершающим этапом обработки при изготовлении деталей является выполнение получистовых и чистовых операций, назначение которых — получить необходимую точность и чистоту поверхности. Операции аналогичного характера выполняются и при восстановлении деталей, но с учетом специфики свойств электролитического железа (температура в зоне резания не должна превышать 200°C).

Таким образом, полный технологический процесс восстановления деталей электролитическим железом (осталиванием) состоит из трех этапов.

1-й этап включает цикл операций предварительной подготовки деталей к восстановлению. На этом этапе выполняются операции: мойки и обезжиривания деталей, правка центровых отверстий и подготовка поверхностей в качестве ремонтных баз, восстановление поверхностей деталей сопутствующими способами и их предварительная обработка, восстановление геометрических форм у изношенных поверхностей перед осталиванием.

2-й этап состоит из гальванических операций по наращиванию электролитического железа (см. главу III, § 4).

3-й этап включает цикл операций по получистовой и чистовой механической обработке всех восстанавливаемых поверхностей данной детали.

Особенностью построения технологического процесса окончательной механической обработки восстанавливаемых поверхностей деталей с нанесенным слоем электролитического железа является выполнение окончательных (завершающих) операций. Величина припуска под механическую обработку в этом случае должна быть небольшой, но достаточной для получения требуемой точности размеров поверхностей. На величину припуска оказывает влияние не только состояние оборудования и оснастки, но и общая технологическая культура организации производства.

При мелкосерийной организации производства восстановления деталей величину припуска следует увеличить, для чего необходимо умножить величину припуска, взятого из таблицы, на коэффициент серийности $K_c = 1,2$.

8. Оснастка и ванны осталивания при групповой технологии восстановления деталей

Для восстановления деталей машин, кроме гальванической установки, необходимы подвесные приспособления (технологическая оснастка).

К подвесным приспособлениям предъявляются следующие требования:

- обеспечение контакта с малым переходным сопротивлением,
- получение равномерных по толщине покрытий,
- безопасность и удобство в работе,
- надежное крепление деталей и транспортабельность при технологических перемещениях,
- возможность полной загрузки ванн по рабочему объему,
- унифицированность в пределах групп.

От конструкции подвесных приспособлений зависит производительность труда, качество получаемых покрытий и коэффициент загрузки гальванического оборудования.

На рис. 43 приведены основные схемы групповой оснастки. Для 1 группы деталей применяются групповые переналаживаемые приспособления, вмещающие, в зависимости от размеров, по 4—12 деталей на одной подвеске. Подвески собираются из унифицированных деталей, и за счет паза в основании (дет. 5) легко регулируются на любой размер. Повышенные требования предъявляются только к прижимам (дет. 2), которые должны быть жесткими и упругими. Поэтому прижимы изготавливаются из Ст. 65Г с последующей термообработкой. При изготовлении прижимов из Ст. 45 без термической обработки (по опыту завода АРЕМЗ, г. Москва) они быстро в процессе эксплуатации теряют исходную жесткость, и наблюдается частое выпадание деталей из подвесок при технологических перемещениях. Изоляция подвесок, за исключением контактных пяток, производится полихлорвиниловой пленкой в два слоя. Для лучшего прилегания к поверхности подвесного приспособления пленку перед обмоткой подогревают в

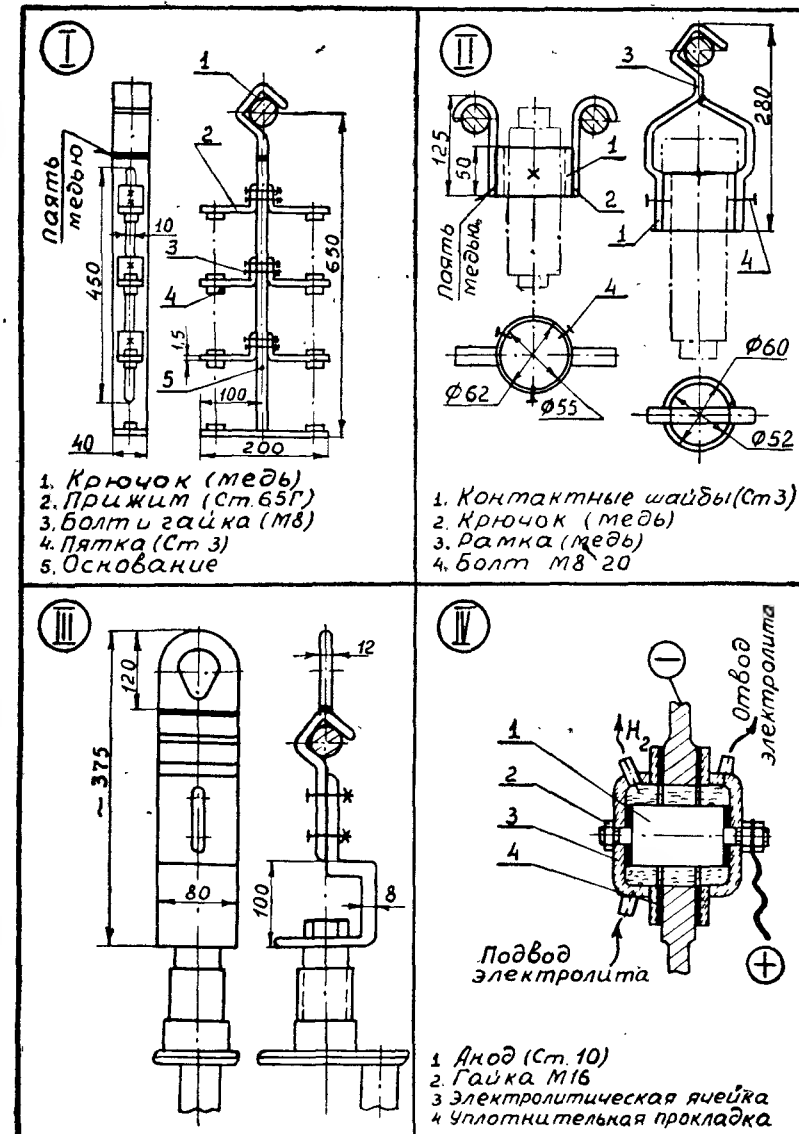


Рис. 43. Схемы групповой гальванической оснастки.

воде при 40—60°C. Срок службы этих подвесок, по наблюдению автора, до ремонта равен 3—4 месяцам непрерывной работы.

Подвесные приспособления II группы индивидуальные, состоящие из контактных колец (дет. 1) и токнесущих крючков. Для восстановления деталей с различными диаметрами на контактных кольцах равномерно по окружности имеются контактные фиксирующие болты (три или два). Приспособления II группы просты по конструкции и надежны в эксплуатации.

Подвесные приспособления III группы отражают специфику деталей этой группы — большие габариты и вес. Поэтому у подвесных приспособлений в верхней части имеются захваты под размер крюка грузоподъемного механизма. Токнесущий крюк имеет за счет пазов и болтовых соединений возможность регулировки по высоте относительно грузовой скобы.

Детали IV группы в ванну не навешиваются, а восстанавливаются в проточном электролите с помощью электролитических ячеек. Электролитическая ячейка, как видно из рис. 43, разъемна и состоит из двух половин. Материалом для изготовления электролитических ячеек может служить оргстекло, второпласт, эбонит, листовая сталь, гуммированная с рабочей стороны, пентопласт, фаолит. Объем каждой ячейки составляет 1,5 объема восстанавливаемой поверхности,

т. е. $\frac{\pi d_b^2 l}{4}$, где d_b — диаметр восстанавливаемой поверхности, мм; l — ширина восстанавливаемой поверхности, мм. Поверхности прилегания ячеек к детали оклеиваются кислотостойкой пористой резиной. Закрепляются обе ячейки при сборке через анод и резьбовые соединения. Аноды изготавливаются из Ст. 10. Диаметр анодов (d_a) выбирается из соотношения $d_a = 0,8 d_b$. Защитные чехлы для анодов не применяются.

Особенностью технологического процесса осталивания является высокая окислительная способность и испаряемость горячего хлористого электролита, уменьшение кислотности электролита в процессе электролиза и загрязнение его шламом — нерастворяющимися составляющими материала анодов.

Исходя из изложенного, к гальваническим установкам предъявляют жесткие требования. Внутренние стенки ванны осталивания должны быть химически стойкими к агрессивной среде электролита при температурах до 90°C. Установки долж-

ны быть снабжены автоматическими устройствами по поддержанию уровня, температуры и кислотности электролита, автоматической установкой для фильтрации электролита и precisely-вытяжной вентиляцией. Указанные особенности способствуют постоянству условий электролиза и безопасной работе.

Технико-экономическими показателями эффективной работы ванн осталивания служат коэффициент загрузки ванн по рабочему объему и равномерность покрытий по толщине. Эти показатели во многом зависят от размеров и типов ванн. Как показали наши исследования, каждой I, II и III группам восстанавливаемых деталей соответствуют свои ванны осталивания.

Ванны для I группы восстанавливаемых деталей имеют общий объем не более 1500 л. Электролит, находясь в ванне указанного объема, качественно и быстро прогревается. Под качеством прогрева электролита подразумевается постоянное значение температуры по всему объему.

При объемах ванн свыше 1500 л начинают наблюдаться слои электролита с различным перепадом температур. С увеличением объемов ванн неравномерность температурных полей растет.

Навешивание подвесных приспособлений с восстанавливаемыми деталями лучше двухрядное, в шахматном порядке, по длине ванны. Аноды располагаются по боковым поверхностям, вдоль ванны. Количество ярусов восстанавливаемых деталей на одном подвесном приспособлении колеблется от двух до шести и зависит от длины монтируемых деталей.

Исходя из планировки расположения деталей I группы в ванне осталивания и прогрева электролита, целесообразно иметь ванну габаритом 700×2000×800. Ширину ванны сверху следует задать на 30 см больше для лучшей ее промывки при технологических осмотрах.

Для уменьшения испаряемости воды зеркало ванны закрывается полиэтиленовой крошкой из расчета толщины защитного слоя 0,7—1,0 см. Перед употреблением крошка вываривается в подкисленной воде (10% HCl) при температуре кипения воды $\tau = 30$ мин. Операцию выварки производят с целью предупреждения занесения в электролит органических примесей. При потемнении защитного слоя до ярко-коричневого цвета его снимают с поверхности ванны и вываривают до просветления аналогичным образом.

Ванны для второй группы восстанавливаемых деталей предназначены для индивидуального их заweighивания. Расположение деталей в ванне двухрядное, количество ярусов в подвесном приспособлении — 1. Габаритные размеры* ванны $750 \times 1200 \times 1000$ мм. Для уменьшения испаряемости зеркало ванны засыпается полиэтиленовой крошкой.

Ванны для третьей группы восстанавливаемых деталей изготавливаются секционными. Детали III группы имеют сложную форму, большие размеры и площади нанесения покрытий, усложненную схему заweighивания анодов. При восстановлении этих деталей в обычных ваннах наблюдается при электролизе взаимное влияние их друг на друга, что приводит к перераспределению силовых полей. В свою очередь перераспределение полей приводит к получению покрытий разной толщины.

Конструктивное решение устройства секционных ванн похоже на переналаживаемые групповые приспособления для металлорежущих станков.

Секционная ванна имеет общий нагревательный блок, в который устанавливаются ванны-секции. Нагревательный блок оснащен автоматическим устройством для поддержания температуры теплоносителя. Конструктивно секции ванн друг от друга отличаются габаритными размерами, а технологически — по количеству деталей в одном завесе — они делятся на индивидуальные и групповые. В индивидуальную секцию для восстановления заweighивается одна деталь, а в групповую секцию 4—6 деталей. Подогрев секций производится через стенки.

Индивидуальные секционные ванны в основном рекомендуются применять для восстановления коленчатых валов, а групповые секционные ванны следует применять для остальных деталей III группы.

Секционные ванны позволяют: конструктивно упростить подвесные приспособления; точно задать и выдержать объемную плотность тока, значительно сократить время на монтаж и демонтаж подвесных приспособлений; непрерывно вести электролиз по отдельным секциям; упростить обслуживание установок; плавно регулировать параметры электролиза; иметь высокий коэффициент загрузки ванн; независимо друг от друга восстанавливать несколько наименований деталей

* Во всех случаях приводятся внутренние размеры ванн.

одновременно; проводить корректировки электролита без остановки всего блока ванн.

Расчет секции ванны состоит из определения размеров ее внутренней части ($B \times L \times H$) с последующим уточнением.

1. Определяется глубина секции (H) ванны:

$$H = 100 + (h_1 + h_2 + h_3), \text{ мм}, \quad (3-85)$$

где:

h_1 — размер погруженной части или всей детали в электролит, мм;

h_2 — расстояние от верхней восстанавливаемой кромки поверхности детали до зеркала ванны (принимается 50—70 мм);

h_3 — расстояние от зеркала до борта ванны (принимается 100 мм).

2. Определяется ширина секции ванны (B):

а) При двухрядном заweighивании в секции:

$$B = (b_1 + b_2) + 250, \text{ мм}, \quad (3-86)$$

где:

b_1 — размер выступающей части (фланца) восстанавливаемой детали, находящейся над электролитом, мм;

b_2 — зазор между фланцами деталей (принимается 50—100 мм).

б) При двухрядном заweighивании деталей без выступающих частей:

$$B = (d_1 + b_2 + 2b_3), \text{ мм}, \quad (3-87)$$

где:

d_1 — диаметр или ширина восстанавливаемой детали, мм;

b_2 — расстояние между деталями (принимается 100 мм);

b_3 — расстояние от восстанавливаемой поверхности до анода (принимается 100—150 мм). Аноды располагаются с 2-х сторон по длине секции.

в) В индивидуальной секции:

$$B = (b_1 + 2b_3), \text{ мм}. \quad (3-88)$$

3. Определяется длина (L) секции ванны:

а) При двухрядном заweighивании деталей с фланцами в групповой секции:

$$z = 2l_1 + nl_2 + nl_2 + (n-1)l_3, \text{ мм}; \quad (3-89)$$

где:

l_1 — размер между стенкой ванны и краем фланца детали (принимается 50—100 мм);

l_2 — длина фланца детали, мм;

l_3 — зазор между фланцами (принимается 30—80 мм);

n — число деталей в ряду.

б) При двухрядном завешивании деталей без выступающих частей в групповой секции:

$$z = 2l_1 + nd + (n-1)l_3, \text{ мм}; \quad (3-90)$$

где:

d — диаметр или ширина восстанавливаемой детали, мм;

l_3 — зазор между деталями (принимается 100 мм).

в) При восстановлении деталей в индивидуальной секции:

$$z = 2l_1 + d, \text{ мм}; \quad (3-91)$$

где:

d — диаметр или ширина поверхности детали, расположенная вдоль ванны;

l_1 — расстояние между стенкой ванны и краем восстанавливаемой детали (принимается 100—150 мм).

После определения габаритов секции ванны находится общий ее объем $V_0 = B \times L \times H, \text{ м}^3$.

Далее определяется рабочий объем (V_p) секции ванны или количество электролита:

$$V_p = \frac{I_{\max}}{1000[D_0]}, \text{ м}^3; \quad (3-92)$$

где:

$I_{\max}$ — максимальная сила тока, подаваемая на штанги ванны, а;

D_0 — допустимая объемная плотность тока, а/л;

1000 — переводной коэффициент.

Максимальная сила тока ($I_{\max}$) определяется:

$$I_{\max} = D_k \sum_{i=1}^q f, \text{ а}; \quad (3-93)$$

где:

D_k — технологически необходимая плотность тока, а/дм²;

f — площадь восстанавливаемой поверхности детали, дм²;

q — количество деталей в завесе.

У секции ванны следует различать четыре объема: общий объем (V_0), рабочий объем (V_p), объем загружаемых деталей (V_v) — объем вытеснения, объем безопасности (V_6). Эти объемы после технологических расчетов уточняются. Они находятся в соотношении:

$$V_0 = (V_p + V_v) \cdot K, \text{ м}^3; \quad (3-94)$$

где: K — коэффициент, характеризующий объем безопасности. (В расчетах принимается $K=1,1$).

После уточнения общего объема секции приводятся в соответствие габаритные размеры и данные объемов.

Эта методика расчета применима и для уточнения размеров ванн I и II групп восстанавливаемых деталей.

Секционные ванны требуют разделения общей электрической схемы подвода постоянного тока на число цепей, равных количеству секций. Цепь каждой секции должна иметь автономное регулирование силы тока.

Гальванические установки для IV группы восстанавливаемых деталей имеют в настоящее время две конструктивные схемы исполнения подачи электролита к электролитическим ячейкам.

Первая схема, разработанная П. И. Мирзоянцем. Электролит постоянно прорабатывается при малых плотностях тока ($D_k = 7 \text{ а/дм}^2$) в уравнивательной ванне, расположенной на высоте 1,5—2,0 м от уровня электролитических ячеек. В этой ванне электролит подогревается до 90°С и самотеком по трубопроводу подается к электролитическим ячейкам. Из ячеек электролит сливается в приемную ванну, из которой насосом из кислотостойкого материала перекачивается в уравнивательную ванну.

Вторая схема (предложена автором совместно со старшим мастером гальванического цеха завода АРЕМЗ Н. В. Галдобенковым). Электролит из ванны, используемой для восстановления I группы деталей, во время ее работы подается специальным насосом с производительностью 20 л/мин в коллектор, из которого электролит поступает к ячейкам, и далее самотеком сливается в ванну осталивания.

Вторая схема более проста в исполнении, экономична и не требует дополнительных ванн. При технологическом исполнении второй схемы необходимо иметь резерв электролита в ванне осталивания (около 10%) за счет неполной загрузки ванны по рабочему объему.

9. Планирование объема работ гальванических установок

Обеспечение полной загрузки гальванического оборудования восстанавливаемыми деталями немислимо без четкого внутрицехового планирования.

Расчет загрузки ванн или вневанных установок осталивания следует производить посменно, по каждой группе восстанавливаемых деталей. Основным, наиболее характерным расчетным показателем, является завес. Завесом называется количество одноименных деталей, одновременно загружаемых в ванну осталивания для восстановления. Величина завеса устанавливается в зависимости от рабочего объема ванны (V_p) и площади восстанавливаемой поверхности детали.

Восстанавливаемые детали в завесе, кроме одноименности, должны иметь одинаковую величину износа, что обеспечивает идентичность времени электролиза.

Продолжительность времени наращивания электролитического железа на восстанавливаемые детали, находящиеся в одном завесе, определяется циклом работы ванны или вневанной установки осталивания. Цикл представляет собой сумму основного времени (T_0) и операционного неперекрываемого времени ($t_{оп.н.}$).

Детали первой, второй и третьей групп восстанавливаются в соответствующих ваннах, детали четвертой группы восстанавливаются проточным осталиванием, и загрузка вневанных установок рассчитывается подетально.

Каждая гальваническая установка должна быть снабжена всей необходимой оснасткой для восстановления деталей данной группы.

При переходе с восстановления одного наименования деталей на следующий переналадка гальванического оборудования осуществляется рабочим-гальваником, за которым оборудование закреплено.

С целью сокращения времени на переналадку, повышения производительности труда следует в течение смены на каждой ванне и вневанной установке восстанавливать детали только одного наименования, и переналадку оборудования на восстановление следующих деталей данных групп осуществлять в начале каждой смены.

Особенностью всех промышленных гальванических установок твердого осталивания является подогрев электролита и поддержание температуры на уровне $75 \pm 1^\circ \text{C}$. Разогрев электролита ванны требует 2—3 часа рабочего времени. Для

ликвидации таких непроизводительных затрат рабочего времени следует планировать трехсменную работу гальванического цеха или оборудовать электролизные установки автоматом разогрева с часовым механизмом при двухсменной работе.

Величина партии восстанавливаемых деталей определяется характером производства и годовой программой выпускаемой продукции. Годовую программу по восстановлению деталей при известном выпуске машин можно подсчитать как по приведенным площадям покрытий на автомобиль, так и по количеству восстанавливаемых деталей.

Расчет по приведенным площадям покрытий на автомобиль чаще всего рекомендуется проводить при укрупненном планировании. Первоначально определяется общая годовая программа цеха по формуле:

$$F = N_{\text{изд}} \cdot f, \text{ дм}^2, \quad (3-95)$$

где:

F — суммарная годовая площадь покрытия, дм^2 ;

$N_{\text{изд}}$ — годовая программа ремонта машин, шт.;

f — удельная площадь покрытия на автомобиль, дм^2 (выбирается по табл. 23).

Далее определяется годовой объем работ по каждой группе восстанавливаемых деталей, для чего общий годовой объем работ (F) расчленяется согласно удельному весу группы (табл. 32).

Таблица 32
Удельный вес групп при восстановлении деталей автомобилей

Номер группы	Удельный вес, %
I	27
II	21
III	37
IV	15

Количество ванн или вневанных установок осталивания, необходимых для выполнения производственной годовой программы, определяется по формуле:

$$K_v = \frac{F}{Q_r}, \text{ шт.}, \quad (3-96)$$

где:

K_v — количество ванн или вневанн установок осталивания, шт.;

Q_r — средняя годовая производительность гальванических установок, дм^2 (выбирается по табл. 33).

Таблица 33

Средняя годовая производительность гальванических установок

Номер групп	Характеристика гальванического оборудования	Средняя годовая производительность гальванических установок при 2-сменной работе, дм^2
I	Ванна, рабочим объемом 1000 л	70000
II	Ванна, рабочим объемом 700 л	56000
III	Одна секция ванны	18000
	Блок секционных ванн	72000
IV	Вневанная установка на восстановление одной детали	6050
	Вневанная установка на восстановление четырех деталей	25100

Расчет по количеству восстанавливаемых деталей рекомендуется проводить при текущем планировании. Общая годовая программа цеха в этом случае определяется

$$n_{\text{дет}} = N_{\text{изд}} \cdot q \cdot \eta, \text{ шт.}, \quad (3-97)$$

где:

$n_{\text{дет}}$ — годовая программа восстанавливаемых деталей, шт.;

$N_{\text{изд}}$ — годовая программа ремонта машин, шт.;

q — количество одноименных деталей в машине;

η — коэффициент восстановления деталей (выбирается по приложению 1).

Общепринятой методики определения величины месячной производственной программы по восстановлению деталей пока не существует, но, пользуясь практикой работой авторемонтных заводов, можно рекомендовать соотношение:

$$n_{\text{мес}} = 0,083 \cdot n_{\text{дет}}, \text{ шт.}, \quad (3-98)$$

где $n_{\text{мес}}$ — количество деталей данного наименования, восстанавливаемых в течение месяца, шт.

Месячная производственная программа цеха, определенная в номенклатуре восстанавливаемых деталей, расчленяется, согласно критериальным групповым признакам, техноло-

гом цеха или на ЭВМ, составляется сводная характеристика по каждому наименованию восстанавливаемых деталей (приложение 2).

Далее плановым отделом совместно с начальником гальванического цеха составляется номенклатурный план-график работы цеха (приложение 3). На основании месячного производственного задания планируются:

а) количество деталей в одном завесе ($n_{\text{д.з.}}$) ванны:

$$n_{\text{д.з.}} = \frac{V_p D_0}{1000 j_d \cdot D_k}, \text{ шт.}, \quad (3-99)$$

где:

V_p — рабочий объем электролита в ванне, м^3 ;

D_0 — объемная плотность тока, а/л ;

1000 — переводной коэффициент;

j_d — восстанавливаемая площадь детали, дм^2 ;

D_k — катодная плотность тока, а/дм^2 .

б) длительность цикла работы ванны осталивания (ζ):

$$\zeta = T_0 + \Sigma \tau_{\text{оп.п.}}, \text{ мин.}, \quad (3-100)$$

где: T_0 — основное время или время электролиза, мин.;

$\Sigma \tau_{\text{оп.п.}}$ — операционное время, не перекрываемое основным временем. (Время загрузки и выгрузки восстанавливаемых деталей, разгона ванн, выдержки деталей без тока: выбирается по табл. 34).

Таблица 34

Значения $\tau_{\text{оп.н.}}$ и $\tau_{\text{оп.п.}}$ по группам восстанавливаемых деталей

Номера групп	Среднее время на одну деталь, мин		В % от T_0 на завес	
	$\tau_{\text{оп. н.}}$	$\tau_{\text{оп. п.}}$	$\tau_{\text{оп. н.}}$	$\tau_{\text{оп. п.}}$
I	0,84	2,2	0,44	0,74
II	4,20	9,0	0,97	2,10
III	9,40	8,7	1,54	2,05
IV	1,80	4,8	0,10	0,10

Где $\tau_{\text{оп.п.}}$ — операционное время, перекрываемое основным временем.

в) количество завесов в смену:

$$K_{\text{зав.}} = \frac{\Phi_p}{\zeta}, \quad (3-101)$$

где:

Φ_p — сменный фонд времени оборудования, мин;

ψ — длительность цикла, мин;

Γ — число смен, необходимое для выполнения плана восстановления деталей данного наименования:

$$C = \frac{n_{\text{мес}}}{n_{\text{д.з.}} \cdot K_{\text{зав}}}; \quad (3-102)$$

где:

$n_{\text{мес}}$ — количество деталей, восстанавливаемых в месяц по программе, шт.;

$n_{\text{д.з.}}$ — количество восстанавливаемых деталей в одном завесе, шт.;

$K_{\text{зав.}}$ — количество завесов в одну смену.

Конечным этапом планирования месячного производственного плана гальванического цеха является составление графика запуска деталей для восстановления на каждую гальваническую установку.

Расчет сопутствующих способов восстановления следует производить по методике Ф. П. Верещака и Л. А. Абелевича. (Справочник инженера-механика. Том «Проектирование автомобильных предприятий», «Транспорт», М., 1966).

Годовая или месячная программа по сопутствующим способам восстановления деталей рассчитывается, согласно табл. 27, от соответствующей программы покрытий электролитического железа по каждой группе деталей в отдельности. Для проведения укрупненных расчетов следует пользоваться данными табл. 23.

10. Расчет коэффициентов загрузки ванны и вневаннй установок

После расчета программы гальванического цеха и проработки схем групповых технологических процессов восстановления изношенных деталей автомобилей следует произвести общий расчет технико-экономической эффективности. Основой расчета является полнота использования возможностей ванны или вневаннй установок осталивания.

Любую электролитическую ванну следует характеризовать четырьмя объемами. 1) Общий объем ванны (V_0) показывает максимальную ее вместимость. 2) Рабочий объ-

ем ванны (V_0) характеризует количество имеющегося электролита. 3) Объем вытеснения (V_v) указывает на максимальный объем загружаемых деталей при восстановлении. 4) Объем безопасности (V_6) фиксирует объем ванны, не заполненный электролитом, для предохранения от выплескивания последнего. Объем безопасности ванны следует определять из соотношения:

$$V_6 = V_0 - (V_p + V_v), \text{ м}^3. \quad (3-103)$$

Для экономической работы гальванических ванн необходимо, чтобы полнее работал электролит по рабочему объему, т. к. от величины объема электролита зависит максимальная величина пропускаемой через ванну силы тока. Соответствие по V_p характеризуется коэффициентом использования объема ванны (η_0):

$$\eta_0 = \frac{V_p'}{V_p}; \quad (3-104)$$

где:

V_p' — объем электролита в ванне при восстановлении деталей данного наименования, м^3 ;

V_p — расчетный объем электролита ванны, который определяется из соотношения $V_p = V_0 - (V_v + V_6)$, м^3 .

Величина коэффициента использования объема ванны (η_0) меньше единицы, и чем ближе значение этой величины к единице, тем полнее используется объем электролита ванны. В основном убыль объема электролита в ванне связана с испарением воды через зеркало ванны, а также с выносом его осадкой и поверхностями восстанавливаемых деталей.

Исследования, проведенные И. Д. Шинковским, под руководством автора, показали, что при длительности электролиза до 60 мин экономически выгодно иметь объемную плотность тока $D_0 = 3 \text{ а/л}$, и при длительности электролиза свыше 60 мин принимать $D_0 = 2 \text{ а/л}$. Полноту использования объема электролита по величине пропускаемой силы тока целесообразно характеризовать коэффициентом загрузки ванны по объемной плотности тока (η_1):

$$\eta_1 = \frac{D_k \cdot \Sigma f_v}{V_p \cdot D_0 \cdot 1000} = \frac{I}{1000 \cdot V_p \cdot D_0}; \quad (3-105)$$

где

D_k — плотность тока, а/дм^2 ;

Σf_v — общая площадь восстанавливаемых поверхностей деталей в завесе, dm^2 ;

V_p — расчетный объем электролита в ванне, m^3 ;

D_0 — объемная плотность тока, a/l ;

I — сила тока, подаваемая на штанги ванны, a ;

1000 — переводной коэффициент.

Коэффициент загрузки ванны по объемной плотности тока показывает, как используется ванна по количеству пропускаемого электричества. Однако этот коэффициент (η_l) не дает представления о том, в какой мере используется ванна непосредственно по основному времени (T_0). Это положение можно характеризовать коэффициентом использования ванны по оперативному времени ($\eta_{оп}$):

$$\eta_{оп} = \frac{T_0}{\sum_1^n T_{ш.к.}}, \quad (3-106)$$

где $\sum_1^n T_{ш.к.}$ — штучно-калькуляционное время одного завеса, мин.

Для секционных гальванических ванн коэффициенты загрузки первоначально находятся по каждой секции отдельно, а потом определяются средние их значения на весь блок. Аналогичным образом рассчитываются коэффициенты загрузки вневанных установок осталивания.

11. Экономическая эффективность групповой технологии восстановления деталей

В докладе Л. И. Брежнева на совместном торжественном заседании ЦК КПСС, Верховного Совета СССР, Верховного Совета РСФСР, посвященном 100-летию со дня рождения В. И. Ленина, говорилось: «Наша страна станет еще сильнее и богаче, наше движение к коммунизму ускорится, если мы научимся беречь каждую минуту рабочего времени, каждый грамм сырья и топлива, каждую деталь машины, каждую трудовую копейку». Эти слова имеют прямое отношение к технологии восстановления изношенных деталей машин.

Групповая технология восстановления деталей позволила увеличить производительность гальванического оборудования, унифицировать подвесные приспособления, значительно сократить время технологической подготовки производства.

Эффективность унификации подвесных приспособлений при групповой технологии восстановления деталей выражается в снижении их стоимости, в конструктивном упрощении отдельных узлов и уменьшении числа элементов, в снижении вспомогательного времени на монтаж и демонтаж восстанавливаемых деталей (табл. 35).

Таблица 35

Унификация подвесных приспособлений

Характеристика показателей	Метод восстановления деталей	
	подетальный	групповой
Средняя стоимость подвесного приспособления (руб.)	18,0	8,5
Количество видов подвесных приспособлений (шт.)	29,0	10,0
наладок (шт.)	4,0	19,0
Количество конструктивных элементов (усредненное) в приспособлении (шт.)	18,0	5,0
Вспомогательное (усредненное) время на монтаж и демонтаж деталей в одно подвесное приспособление (мин)	0,52	0,22

Эффективность технологической подготовки производства при групповой технологии выражается в сокращении времени разработки технологических процессов на восстановление деталей, в сокращении сроков конструкторской разработки гальванического оборудования, в уменьшении сроков отработки режимов электролиза (табл. 36).

Таблица 36

Усредненные показатели по технологической подготовке производства

Характеристика показателей	Метод восстановления деталей	
	подетальный	групповой
Отладка технологического процесса восстановления детали (нормо-часы)	130	16
Определение условий электролиза и обоснование режимов (нормо-часы)	200	4
Проектирование гальванического оборудования (нормо-часы)	310	180
Проектирование подвесных приспособлений (нормо-часы)	42	8

Групповая технология восстановления деталей позволила увеличить производительность ванн осталивания и сократить

величины неперекрываемого и перекрываемого оперативного времени (табл. 37).

Таблица 37

Усредненные показатели производительности гальванического оборудования

Характеристика показателей	Метод восстановления деталей	
	подетальный	групповой
Коэффициент загрузки ванны по объемной плотности тока (γ_r)	60	92
Годовая производительность одного литра рабочего объема ванны (V_p), дм ²	50	70
Оперативное неперекрываемое время ($\tau_{оп.н.}$) на одну деталь, мин.	5,40	3,93
Оперативное перекрываемое время ($\tau_{оп.п.}$) на одну деталь, мин.	10,1	6,2

На рис. 44 показана загрузка рабочего объема ванны при групповой и подетальной технологии восстановления. При подетальной технологии восстановления вся указанная номенклатура деталей загружается в одну ванну ($V_p=1100$ л). Вполне естественно, что детали разных форм, размеров невозможно рационально разместить в одном и том же объеме ванны. Дополнительно к этому, у большинства подвесных приспособлений отсутствует ярусность. Указанные причины и отражаются на значениях коэффициентов загрузки ванны по объемной плотности тока.

Эффективность использования электролита с псевдостационарными свойствами. По данным завода АРЕМЗ (г. Москва) и АРЗ-2 (г. Омск), после внедрения в технологический процесс электролита с псевдостационарными свойствами число корректировок сократилось от двух в смену до одной в три месяца.

Общая продолжительность корректировок электролита в одной ванне, по данным автора, в среднем составляла 14% от действительного годового фонда времени работы оборудования (при двухсменной работе). После внедрения электролита с псевдостационарными свойствами время продолжительности корректировок уменьшилось до 0,2%.

Годовой экономический эффект на одну ванну остаивания от сокращения числа корректировок электролита определится:



- Загрузка ванн при подетальной технологии.
 - Загрузка ванн при групповой технологии.

Рис. 44. Влияние на коэффициент загрузки ванн организационной структуры при восстановлении деталей.

$$\mathcal{E} = \frac{\Phi(T_1 - T_2)}{100} \cdot \left(\frac{F \cdot C_q}{\Phi} \right) = \frac{(T_1 - T_2) \cdot F \cdot C_q}{100}, \text{ руб.}$$

где:

$\mathcal{E}$ — годовой экономический эффект, руб.;

Φ — годовой действительный фонд времени работы оборудования при двухсменной работе, час.;

T_1, T_2 — продолжительность корректировок электролита до внедрения электролита с псевдостационарными свойствами и после внедрения, %;

F — общая годовая производительность ванны остоаливания, дм^2 ;

C_q — стоимость одного дм^2 покрытия, руб. (по данным АРЕМЗ 0,2 руб.);

при групповой технологии восстановления деталей (по 1 группе) $V_p = 1100 \text{ л}$:

$$\mathcal{E} = \frac{(14 - 0,2) \times 72000 \times 0,2}{100} = 1987 \text{ руб.};$$

при поддетальной технологии восстановления ($V_p = 1100 \text{ л}$):

$$\mathcal{E} = \frac{(14 - 0,2) \times 55000 \times 0,2}{100} = 1518 \text{ руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в условиях авторемонтного производства все большее количество изношенных деталей восстанавливается остоаливанием.

Видимые простота и доступность технологического процесса остоаливания для рабочего персонала невысокой квалификации способствуют появлению большого количества различных рекомендаций, порой противоречивых, а часто необоснованных.

Прежде всего, следует помнить, что электролитическое железо не является по своим физико-механическим свойствам аналогом среднеуглеродистой закаленной стали, а представляет собой специфичный материал с характерными и присущими только ему свойствами.

При восстановлении изношенных поверхностей деталей не следует стремиться к получению высокой твердости покрытий электролитического железа, т. к. величина твердости покрытий электролитического железа не находится в прямой зависимости с их долговечностью. Повышению долговечности покрытий электролитического железа способствует только оптимальная величина их твердости, которая зависит от марки сопряженного материала и параметров электролиза.

В силу особенностей физико-механических свойств, присущих электролитическому железу, оптимальная чистота восстановленных поверхностей не совпадает с чистотой, заданной рабочими чертежами на изготовление этих деталей.

Температура простых хлористых электролитов остоаливания не должна быть при восстановлении деталей ниже 70°C . В случае снижения температуры электролита за указанные пределы покрытия электролитического железа получают раз-

рушенную слоистую структуру, которая значительно сокращает их долговечность.

При механической обработке покрытий электролитического железа для понижения температуры в зоне резания необходимо применять смазочно-охлаждающие жидкости. Температура в зоне резания не должна превышать 200° С.

С целью повышения экономичности технологического процесса восстановления деталей осталиванием нужно постоянно стремиться к уменьшению припуска под механическую обработку, для чего следует уделять повседневное внимание состоянию оборудования и оснастки, а также выбору поверхностей, дающих минимальные погрешности при использовании их в качестве установочных баз.

Приложение 1

Номенклатура и коэффициенты восстановления деталей

Наименование деталей	Модели автомобилей					
	ЗИЛ-164	ГАЗ-51	МАЗ-200 МАЗ-205	«Москвич» 403	«Волга» ГАЗ-51	ГАЗ-69 УАЗ-450
	Коэффициенты восстановления					
1	2	3	4	5	6	7

Двигатель

Блок цилиндров	0,01	0,42	—	0,10	—	—
Шатун	0,07	0,32	0,18	0,33	0,03	0,18
Гильза	—	—	0,97	—	—	—
Распределительный вал	0,14	0,14	0,13	0,42	0,14	0,13
Впускной клапан	0,10	0,04	—	0,06	0,10	0,10
Выпускной клапан	0,10	0,04	0,04	0,06	0,10	0,10
Коленчатый вал	0,27	0,16	0,16	0,18	0,17	0,09
Толкатель	0,16	0,30	—	0,15	0,28	0,56
Вал масляного насоса	0,08	—	—	—	—	—
Вал водяного насоса	0,40	0,20	—	0,32	0,22	0,20
Ось педалей сцепления	—	—	0,08	—	—	—
Вал балансирный	0,80	0,70	—	0,90	—	0,71
Ось коромысел	—	—	0,05	0,10	—	—
Поршневой палец	0,20	0,90	0,20	0,90	0,53	0,90
Толкатель коромысел	—	—	0,10	—	—	—
Вал шестерен привода нагнетателя	—	—	0,02	—	—	—
Кронштейн-ось промежуточного привода шестерен масляного насоса	—	—	0,36	—	—	—
Клапан (редукционный) масляного насоса	—	—	0,05	—	—	—
Вал включения сцепления	—	—	0,47	—	—	—
Ротор воздушного нагнетателя	—	—	0,65	—	—	—

1	2	3	4	5	6	7
Коробка передач						
Картер	0,36	0,10	0,53	0,20	0,19	0,20
Вал ведущий	0,05	—	0,30	0,05	—	0,20
Ось шестерни заднего хода	0,50	0,50	—	—	—	—
Вал ведомый	0,27	0,05	0,52	—	—	0,50
Ось блока шестерен промежу- точного вала	—	0,30	—	0,60	—	0,50
Вал промежуточный	—	0,20	0,02	—	—	—
Вал (ведущий) раздаточной ко- робки	—	—	—	—	—	0,10
Вал (промежуточный) раздаточ- ной коробки	—	—	—	—	—	0,10
Вал ведомый	—	—	—	—	0,10	—
Ось блока шестерен заднего хода	—	—	0,67	0,75	—	—
Задний мост						
Труба полуоси	0,12	—	—	—	0,11	—
Картер редуктора	0,16	—	0,14	—	0,12	—
Ось колодок тормоза	0,36	—	—	—	—	—
Разжимной кулак	0,23	—	0,42	—	—	—
Крестовина дифференциала	0,07	—	—	—	—	—
Вал ведущий	—	0,06	—	—	—	—
Крышка картера	—	—	—	—	—	0,80
Картер	—	—	—	—	—	0,80
Ось сателлитов дифференциала	—	—	—	—	0,20	0,20
Шестерня полуоси	—	—	—	—	0,08	—
Крестовина карданного вала	0,20	—	0,95	—	0,35	0,95
Чашка дифференциала	—	—	0,14	—	—	—
Передняя ось						
Поворотная цапфа	0,55	0,08	0,47	—	0,08	0,24
Шкворень	0,25	0,32	0,57	—	0,25	—
Ось колодок переднего тормоза	0,36	—	—	—	—	—
Кулак разжимной тормозов пе- реднего колеса	0,23	—	0,42	—	—	—
Шаровой палец	0,08	0,07	—	—	—	—
Рычаг рулевой трапеции	—	0,10	—	—	—	—
Рычаг поворотной цапфы	—	—	0,08	—	—	—
Цапфа	—	—	—	—	—	0,68
Шаровая опора переднего веду- щего моста	—	—	—	—	—	0,30
Стойка подвески	—	—	—	0,28	—	0,25
Палец стойки передней под- вески	—	—	—	0,95	—	—
Рулевое управление						
Вал сошки руля	0,20	—	—	0,24	—	0,05
Ось ролика руля	0,70	—	—	—	—	—

1	2	3	4	5	6	7
Компрессор						
Коленчатый вал	0,12	—	0,12	—	—	—
Опрокидывающий механизм						
Шток поршня	—	—	0,09	—	—	—
Карданный вал привода насоса опрокидывающего механизма в сборе	—	—	0,15	—	—	—

Приложение 2

Расчетные режимы на восстанавливаемые детали

№№ групп	Наименование деталей	Марка автомобиля	Индекс или номер детали	Ведущая износ (Δn)	Припуск на обработку (Δn)	Толщина покрытия $\delta = \delta_1 + \delta_2$	Время заготовки $t_{заг}$, час	Марка сопряженного материала	D_k (табл. 7)	f покрытия де-тали, мм^2	Рабочая сила тока на ванну, $I, \text{а}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

I

138

II

III

IV

Приложение 3

Номенклатурный план-график на восстановление деталей

№№ групп	Наименование деталей	Индекс или номер детали по каталогу	Месячная программа выпуска деталей, шт.	Количество деталей в одном заводе, шт.	Цикл работы ванны или ванной установки (II), час	Количество заводов в смену	Число смен или заводов, потребных для выполнения месячной программы
1	2	3	4	5	6	7	8

I

139

II

III

IV

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. М., «Машиностроение», 1969.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
3. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., «Наука», 1969.
4. Гнусин Н. П., Коварский Н. Я. Шероховатость электроосажденных поверхностей. М., «Наука», 1970.
5. Кори Г. и Кори Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., «Наука», 1968.
6. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств. М., «Мир», 1970.
7. Кудрявцев Н. Т., Кругликов С. С., Воробьева Г. «ЖВХО им. Менделеева», 8, № 5, 483, 1963.
8. Мелков М. П. Твердое осталивание. Докторская диссертация, Саратов, 1960.
9. Мелков М. П. Гальваническое наращивание деталей машин железом. М., 1971.
10. Мелков М. П., Намаконов Б. В. Авторское свидетельство № 238981.
11. Мищенко К. П., Равдаль А. А. Практические работы по физической химии. Л., «Химия», 1967.
12. Мелкова И. М. Исследование условий повышения долговечности электролитических железных покрытий. Кандидатская диссертация. М., МАДИ, 1970.
13. Митрофанов С. П. Научные основы технологической подготовки группового производства. М.—Л., «Машиностроение», 1965.
14. Пензов Ю. Е. Элементы математической логики и теории множеств. Саратовский университет, 1968.
15. Плоткин И. Б. Операционные припуски и допуски на механическую обработку. М., Машгиз, 1947.
16. Соколовский А. П. Научные основы технологии машиностроения. М.—Л. Машгиз, 1955.
17. Швецов А. Н. Выбор деталей для осталивания. «Автомобильный транспорт», № 3, 1971.
18. Швецов А. Н. Исследование антифрикционных свойств покрытий, полученных способом твердого осталивания. Кандидатская диссертация. М., МАДИ, 1969.
19. Швецов А. Н. Приработка покрытий электролитического железа. «Автомобильный транспорт», № 4, 1972.
20. Heipholg, J., Gaeger K. W., Ingenieur — Statistik, München Wien, 1964.
21. Duncan A. J., Quality Control and Industrial Statistics, Home Wood, 1959.
22. Weber E. Gröndriß der biologischen Statistik, 4. Aufl. Jena, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
--------------------	---

Глава I

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА

1. Антифрикционность покрытий электролитического железа	6
2. Взаимосвязь между параметрами трения и усредненной температурой на поверхности контакта	15
3. Особенности прирабатываемости электролитического железа	19
4. Изнашиваемость электролитического железа	25
5. Взаимодействие поверхностных пленок у сопряжений «покрытие—подшипниковый материал»	30
6. Работоспособность покрытий оптимальной микротвердости, полученных из электролитов различной концентрации	37

Глава II

ОСНОВЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

1. Физико-химические свойства электролитов осталивания	46
2. Условия псевдостационарности электролитов осталивания	54
3. Выбор пределов кислотности	62
4. Выбор рациональной начальной плотности тока	63
5. Взаимосвязь между параметрами электролиза и величиной микротвердости покрытий	66
6. Определение наимыгоднейшей объемной плотности тока	73
7. Сущность выбора рациональных режимов электролиза	77

Глава III

ОСНОВЫ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

1. Теоретическое обоснование номенклатуры восстанавливаемых деталей	80
2. Определение номенклатуры восстанавливаемых деталей	86
3. Особенности износа восстанавливаемых поверхностей	89
4. Обоснование групп восстанавливаемых деталей	92
5. Сочетание способов восстановления деталей при групповой технологии	100
6. Распределение толщины электролитического железа по поверхности катода	103
7. Расчет величины припуска покрытий под механическую обработку	108
8. Оснастка и ванны осталивания при групповой технологии восстановления деталей	114
9. Планирование объема работ гальванических установок	122
10. Расчет коэффициентов загрузки ванн и вневаннных установок	126
11. Экономическая эффективность групповой технологии восстановления деталей	128
Заключение	133
Приложения	135
Литература	140